

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Hrvoje Selak**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum, dipl. ing.

Student:

Hrvoje Selak

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Željku Šitumu na korisnim savjetima i pruženoj podršci tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem se i ostalim kolegama na dodatnim savjetima, a posebno se zahvaljujem kolegi Marinu Miletiću na suradnji na zadanom sustavu. Najviše se zahvaljujem svojim roditeljima na pruženoj podršci tijekom cijelog studija.

Hrvoje Selak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **HRVOJE SELAK**

Mat. br.: 0035195513

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**KONSTRUKCIJA SUSTAVA KUGLICE NA PLOČI POKRETANOG  
PNEUMATSKIM MIŠIĆIMA**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**THE CONSTRUCTION OF A BALL-ON-PLATE SYSTEM  
POWERED BY PNEUMATIC MUSCLES**

Opis zadatka:

Balansirajući sustavi predstavljaju intenzivno korištene objekte za istraživanje i testiranje različitih tehnika i algoritama regulacije. Sustav kuglice na ploči spada u skupinu oglednih primjera koji se mogu koristiti za eksperimentalnu provjeru naprednih algoritama regulacije i za objašnjenje teorije upravljanja multivarijabilnih, nelinearnih sustava s inherentnom nestabilnošću. Ovaj balansirajući mehanizam spada i u skupinu podupravljanih sustava kod kojih dimenzija stupnjeva slobode gibanja premašuje dimenziju upravljačkih varijabli. Razmatrani sustav ima četiri stupnja slobode gibanja - dvoosni zakret ploče i pomak kuglice, te samo dvije upravljačke varijable - momenti ostvareni s dva para pneumatskih mišića kojim se zakreće ploča, dok se kuglica slobodno giba po ploči. Ovakvi modeli su vrlo atraktivni i prikladni za objašnjenje teorije naprednih metoda automatske regulacije, te praktične primjene modernih komponenti iz područja mehatronike, pneumatike, senzorike i dr.

U radu je potrebno:

- konstruirati i izraditi nastavnu maketu kuglice na ploči pokretane s dva antagonistička para umjetnih pneumatskih mišića,
- izabrati i ugraditi sustav mjerenja dvoosnog kuta zakreta ploče i pomaka kuglice,
- izabrati mikrokontroler i izraditi potrebne elektroničke sklopove za praktičnu izvedbu algoritma regulacije,
- razvijene regulacijske algoritme eksperimentalno provjeriti na laboratorijskom modelu sustava kuglice na ploči.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Željko Šitum

v.d. predsjednika Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. KONSTRUKCIJA NASTAVNE MAKETE .....	3
3. PNEUMATSKI ELEMENTI .....	4
3.1. Proporcionalni ventili.....	4
3.1.1. Princip rada proporcionalnog ventila.....	5
3.2. Pneumatski mišići .....	6
3.2.1. Princip rada pneumatskog mišića .....	7
3.2.2. Pneumatski mišić za nastavnu maketu.....	7
4. MJERNI ELEMENTI.....	10
4.1. Žiroskop .....	10
4.1.1. Vrste žiroskopa .....	11
4.1.2. MEMS izvedba .....	12
4.1.3. Žiroskop u obliku čipa oznake MPU-6050 .....	13
4.2. Zaslon osjetljiv na dodir.....	15
4.2.1. Zaslon sa površinskim zvučnim valovima .....	16
4.2.2. Kapacitivni zasloni osjetljivi na dodir .....	16
4.2.3. Zaslon sa infracrvenom mrežom.....	17
4.2.4. Infracrveno projiciranje na akrilne površine .....	18
4.2.5. Optički.....	18
4.2.6. Zasloni koji koriste tehnologiju disperzivnih signala .....	19
4.2.7. Zasloni sa prepoznavanjem zvuka .....	20
4.2.8. Otpornički zasloni .....	20
5. UPRAVLJAČKI ELEMENTI.....	23
5.1. Mikrokontroler .....	23
5.1.1. Mikrokontroler ATmega 328P-AU.....	25
5.2. Tiskana pločica .....	26
5.3. Napajanje sustava.....	27
6. EKSPERIMENTALNI REZULTATI .....	31
7. ZAKLJUČAK.....	34
LITERATURA.....	35
PRILOZI.....	36

## POPIS SLIKA

Slika 1. Nastavna maketa sustava kuglice na ploči .....	2
Slika 2. Konstrukcija sustava kuglice na ploči .....	3
Slika 3. Proporcionalni ventil [4] .....	5
Slika 4. Karakteristika naponskog proporcionalnog ventila [3] .....	6
Slika 5. Umjetni pneumatski mišić [4] .....	7
Slika 6. Radna karakteristika mišića [6] .....	8
Slika 7. Pneumatski mišići i proporcionalni ventili na nastavnoj maketi .....	9
Slika 8. Mehanička struktura žiroskopa [7] .....	11
Slika 9. Žiroskop MPU-6050 [11] .....	13
Slika 10. Upravljački sklop MPU-6050 [13] .....	14
Slika 11. Žiroskop MPU-6050 na nastavnoj maketi .....	15
Slika 12. Zaslon sa površinskim zvučnim valovima [14] .....	16
Slika 13. Kapacitivni zaslon osjetljiv na dodir [14] .....	17
Slika 14. Infracrveni zaslon osjetljiv na dodir [14] .....	17
Slika 15. Infracrveno projiciranje na akrilne površine [14] .....	18
Slika 16. Optički zaslon osjetljiv na dodir [14] .....	19
Slika 17. Zaslon koji koristi tehnologiju disperzivnih signala [14] .....	19
Slika 18. Zaslon sa prepoznavanjem zvuka [14] .....	20
Slika 19. Otpornički zaslon osjetljiv na dodir [14] .....	21
Slika 20. Zaslon osjetljiv na dodir tvrtke NJY .....	21
Slika 21. Zaslon osjetljiv na dodir na nastavnoj maketi .....	22
Slika 22. Ispravljač i tiskana pločica .....	23
Slika 23. Shema pinova mikrokontrolera ATmega 328P-AU [17] .....	25
Slika 24. Tiskana pločica .....	27
Slika 25. Poluvalni ispravljač [18] .....	27
Slika 26. Punovalni ispravljač [19] .....	28
Slika 27. Trofazni poluvalni ispravljač [19] .....	28
Slika 28. Trofazni punovalni ispravljač [19] .....	29
Slika 29. Dodatno filtriranje napona [19] .....	29
Slika 30. Ugrađeni ispravljač na nastavnoj maketi .....	30
Slika 31. Odziv upravljačkog momenta .....	31
Slika 32. Kutna brzina ploče .....	32
Slika 33. Kut zakreta ploče .....	32
Slika 34. Brzina kuglice .....	33
Slika 35. Pozicija kuglice .....	33

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

1. Shema tiskane pločice

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$p$	bar, MPa	tlak
$U$	V	napon
$Q$	m <sup>3</sup> /s	protok
$I$	A	struja
$d$	m	promjer konektora za zrak na ventilu
$T$	°C	temperatura
$l$	m	duljina ventila pod tlakom
$l_0$	m	nominalna duljina ventila
$l_{uk}$	m	ukupna duljina ventila
$d_m$	m	unutarnji promjer ventila
$F$	N	sila
$m$	kg	masa
$x, y$	m	koordinate kuglice na zaslonu osjetljivom na dodir
$\dot{x}, \dot{y}$	m/s	brzina kuglice
$\theta, \psi$	rad	kut zakreta ploče
$\dot{\theta}, \dot{\psi}$	rad/s	kutna brzina ploče
$F_c$	N	Coriolisova sila
$\omega_p$	rad s <sup>-1</sup>	kutna brzina rotirajućeg koordinatnog sustava
$v_r$	m/s	relativna brzina mase u pomičnom koordinatnom sustavu
$a$	m	debljina zaslona osjetljivog na dodir
$R_x$	$\Omega$	otpor zaslona u X smjeru
$R_y$	$\Omega$	otpor zaslona u Y smjeru
$P$	W	snaga



## **SAŽETAK**

Zadatak ovog rada je izraditi nastavnu maketu sustava kuglice na ploči na kojoj će se moći eksperimentalno provjeravati napredni algoritmi regulacije. Nastavna maketa se sastoji od konstrukcijskih elemenata, dva antagonistička para pneumatskih mišića, dva proporcionalna ventila, zaslona osjetljivog na dodir i žiroskopa.

U zadatku je bilo potrebno odabrati senzore koji će se koristiti za mjerenje varijabli stanja, izraditi tiskanu pločicu sa kojom će se upravljati proporcionalnim ventilima i pneumatskim mišićima i rezultate eksperimentalno provjeriti na nastavnoj maketi.

Ključne riječi: mehatronika, konstrukcija, pneumatski mišić, proporcionalni ventil, žiroskop, zaslon osjetljiv na dodir

## **SUMMARY**

Theme of this thesis is to make a teaching model of the 'Ball and plate system', on which could be able to experimentally verify advanced control algorithms. Teaching model consists of construction, two antagonistic pair of pneumatic muscles, two proportional directional control valves, touchscreen and gyroscope.

In this thesis it needs to be chosen which sensors shall be used to measure different state variables, printed circuit board needs to be done which will be used to control proportional directional control valves and pneumatic muscles and results shall be experimentally checked on the teaching model.

Key words: mehatronics, construction, pneumatic muscle, proportional directional control valve, gyroscope, touchscreen

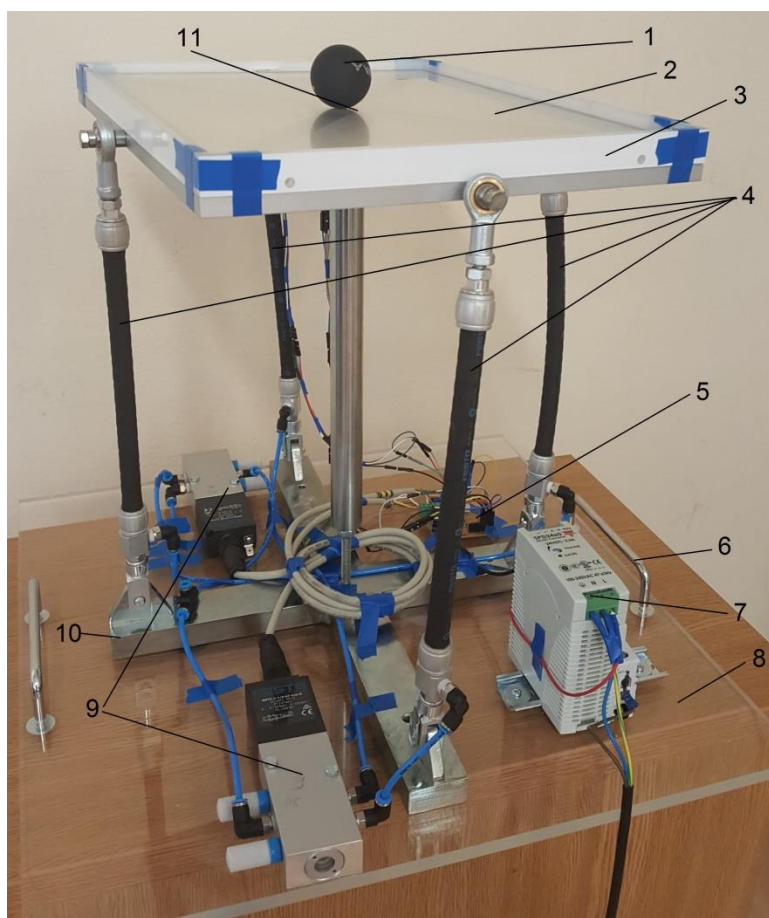
## **1. UVOD**

Balansirajući sustavi predstavljaju intenzivno korištene objekte za istraživanje i testiranje različitih tehnika i algoritama regulacije. Sustav kuglice na ploči spada u skupinu oglednih primjera koji se mogu koristiti za eksperimentalnu provjeru naprednih algoritama regulacije i za objašnjenje teorije upravljanja multivarijabilnih, nelinearnih sustava s inherentnom nestabilnošću.

Dimenzija stupnjeva slobode gibanja ovog sustava premašuje dimenziju upravljačkih varijabli, zbog čega ovaj sustav spada u skupinu podupravljanih sustava. Takve sustave karakterizira izrazita nestabilnost. Razmatrani sustav ima četiri stupnja slobode gibanja - dvoosni zakret ploče i pomak kuglice, te samo dvije upravljačke varijable - momenti ostvareni s dva para pneumatskih mišića kojima se zakreće ploča, dok se kuglica slobodno giba po ploči.

Ovakvi modeli su vrlo atraktivni i prikladni za objašnjenje teorije naprednih metoda automatske regulacije, te praktične primjene modernih komponenti iz područja mehatronike, pneumatike, senzorike, programiranja.

U ovom radu bit će prikazane i opisane mjerne, elektroničke, upravljačke i izvršne komponente koje su napravljene i ugrađene u sustav.



**Slika 1. Nastavna maketa sustava kuglice na ploči**

Na slici 1. je prikazana nastavna maketa. Pozicije pojedinih dijelova:

- 1 - kuglica
- 2 - zaslon osjetljiv na dodir
- 3 - ograda
- 4 - pneumatski mišići
- 5 - tiskana pločica
- 6 - ručke
- 7 - ispravljač
- 8 - postolje od pleksiglasa
- 9 - proporcionalni ventili
- 10 - konstrukcija
- 11 - žiroskop

## 2. KONSTRUKCIJA NASTAVNE MAKETE

Konstrukcija je izrađena u programskom alatu *SolidWorks*. Sastavljena je iz više dijelova. Prikazana je na slici 2.



Slika 2. Konstrukcija sustava kuglice na ploči

Konstrukciju je izradio u okviru svog završnog rada student Tomislav Hodja. Postolje konstrukcije izrađeno je od čelika. Na njemu se nalaze priključci za koje se učvrste pneumatski mišići. Druga strana mišića se pričvršćuje na postolju za ploču. U sredini postolja je navojni provrt M8, u koji ide navojno vreteno. Na navojno vreteno se montira cijev. Zavrtanjem ili odvrtanjem cijevi, može se upravljati visinom postolja za ploču. S gornje strane cijevi je šipka koja je spojena na sferni zglob. Sferni zglob ima tri stupnja slobode gibanja, rotacija oko X osi, rotacija oko Y osi i rotacija oko Z osi. Sferni zglob omogućuje zakret ploče oko X i Y osi. Drugi dio zgloba spojen je na postolje za ploču. Postolje za ploču napravljeno je od legure aluminija. Na postolju za ploču postavljena je ploča od akrilnog stakla, poznata kao i pleksiglas. Na sredini pleksiglasa je napravljena pravokutna šupljina u koju je smješten žiroskop. Na kraju, zaslon osjetljiv na dodir postavljen je na pleksiglas.

### 3. PNEUMATSKI ELEMENTI

Stlačeni zrak, kao glavno sredstvo upravljanja, pokreće sustav kuglice na ploči. Znanstvena i tehnička disciplina koja proučava korištenje stlačenih plinova, pa tako i zraka, zove se pneumatika. Osnovne značajke pneumatike su:

- sigurnost,
- ekološka prihvatljivost,
- nema potrebe za povratnom cijevi jer se zrak može ispuštati u okoliš,
- niski tlakovi (do  $p=15$  bar, odnosno 1,5 MPa),
- velike brzine aktuatora,
- neosjetljivost na opterećenje,
- niska gustoća - nema hidrauličkog udara,
- održavanje je povoljno, cijene elemenata povoljne zbog jednostavne izrade [1].

Dijelovi pneumatskog sustava koji se koriste pri upravljanju kuglice na ploči su:

- kompresor zraka, služi za pretvorbu mehaničke energije u energiju stlačenog zraka,
- proporcionalni ventili i
- pneumatski mišići.

#### 3.1. Proporcionalni ventili

Proporcionalni ventili su ventili čija je izlazna vrijednost proporcionalna ulaznom signalu. Proporcionalnim ventilima upravlja se pomoću električnih signala. Razlikujemo naponski i strujno upravljane proporcionalne ventile. Prednost takvih ventila je što imaju mogućnost kontroliranja brzine toka zraka i mogućnost usmjeravanja toka zraka na dva različita izlaza, za razliku od običnih kod kojih bi trebali imati posebno jedan ventil za kontrolu brzine toka zraka i posebno drugi za usmjeravanje toka zraka [2]. Koriste se kada je potrebno točno pozicionirati cilindar i regulirati izvlačenje cilindra. Zbog pravilnijeg rada i manjih šumova, sva visoko-frekvencijska tehnologija (kao što su: pametni telefoni) trebala bi biti udaljena od proporcionalnih ventila [3].



**Slika 3. Proporcionalni ventil [4]**

### ***3.1.1. Princip rada proporcionalnog ventila***

Princip rada proporcionalnog ventila će biti objašnjen na primjeru rada Festovog MPYE-5-1/8-HF-010-B proporcionalnog ventila. Takva dva ventila su ujedno i ugrađena na nastavnu maketu. Napajanje mu je  $U=24\text{ V}$  (tolerira se od 17 do 30 V). Upravljan je naponskim signalom i to u rasponu od 0 do 10 V, pri čemu mu je 5 V središnji položaj u kojemu su blokirana oba izlaza, odnosno nema propuštanja zraka. Kontinuiranim smanjivanjem napona sa 5 V prema 0 V, postupno se otvara izlaz 2, dok kontinuiranim povećavanjem napona sa 5 na 10 V, postupno se otvara izlaz 4. Na 0 V i 10 V protok zraka je maksimalan, kao što je vidljivo sa slike 4 [3].

Između 0 V i 5 V Između 4 mA i 12 mA	Između 5 V i 10 V Između 12 mA i 20 mA
<p>Q max.</p> <p>0 (4 mA)      Napon (struja)      5 V (12 mA)</p> <p>Protok povećan na izlazu 2</p>	<p>Q max.</p> <p>5 V (12 mA)      Napon (struja)      10 V (20 mA)</p> <p>Protok povećan na izlazu 4</p>
Regulacija tlaka: 1 → 2 Izlaz: 4 → 5	Regulacija tlaka: 1 → 4 Izlaz: 2 → 3

Slika 4. Karakteristika naponskog proporcionalnog ventila [3]

Maksimalni tlak na kojem radi je 10 bar. Nominalna širina konektora za zrak je  $d=6$  mm. Temperatura  $T$  kućišta treba biti između  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , temperatura okoliša između  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dok mu je srednja temperatura između  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2. Pneumatski mišići

Umjetni pneumatski mišići su aktuatori upravljani stlačenim zrakom. Njihova izvedba slična je ljudskim mišićima. Proizvode linearno gibanje u aksijalnom smjeru i kontrakcijsko u radijalnom. Sastoji se od gumene cijevi, koja je ojačana pletenim vlaknima. U većini slučajeva, mišić je izveden tako da je na jednoj strani otvor za dovod zraka, dok je druga strana zatvorena, iako postoje mišići na kojima je dovod zraka sa obje strane. Primjenjuju se u raznim područjima industrijske automatizacije, robotike i fizioterapije. Karakterizira ih mala masa, mala dimenzija, povoljan odnos mase i sile koju proizvode, lako održavanje i dugi vijek trajanja [5]. Mogu ostvariti veliki broj radnih ciklusa zbog svoje male mase. Također, nema pomičnih dijelova koji se mogu potrošiti kao što je klip cilindra. Pneumatski mišić postavlja nove standarde u primjeni gdje se zahtjeva brzo vrijeme odziva. Ima vrlo jednostavan princip rada te se može koristiti u prijenosu radnih predmeta sa jednog mjesta na drugo, jednostavnim



upuhivanjem i ispuhivanjem zraka. Pogodno ga je koristiti u prašnjavim i prljavim uvjetima jer je hermetički zatvoren u odnosu na konvencionalne pogone. Kao takav se ne može habati. Mišić je čvrsta, kontraktibilna „cijev“ koja se može lakoćom nositi sa teškim zahtjevima u industrijskim pogonima [6].

### 3.2.1. Princip rada pneumatskog mišića

Umjetni pneumatski mišić u početnom položaju ima nazivnu duljinu u aksijalnom smjeru i nazivni promjer. Nazivna duljina je ona duljina kada je mišić u opuštenom stanju, odnosno na njega ne djeluje nikakva sila i nije pod tlakom. Dovođenjem stlačenog zraka u mišić, on se istovremeno aksijalno sužava (kontrahira) i radijalno širi (ekspandira), pri čemu se ostvaruje vlačna sila i linearno i jednosmjerno gibanje [5]. Koliko će se mišić kontrahirati ovisi o tlaku zraka koji je pušten u njega.

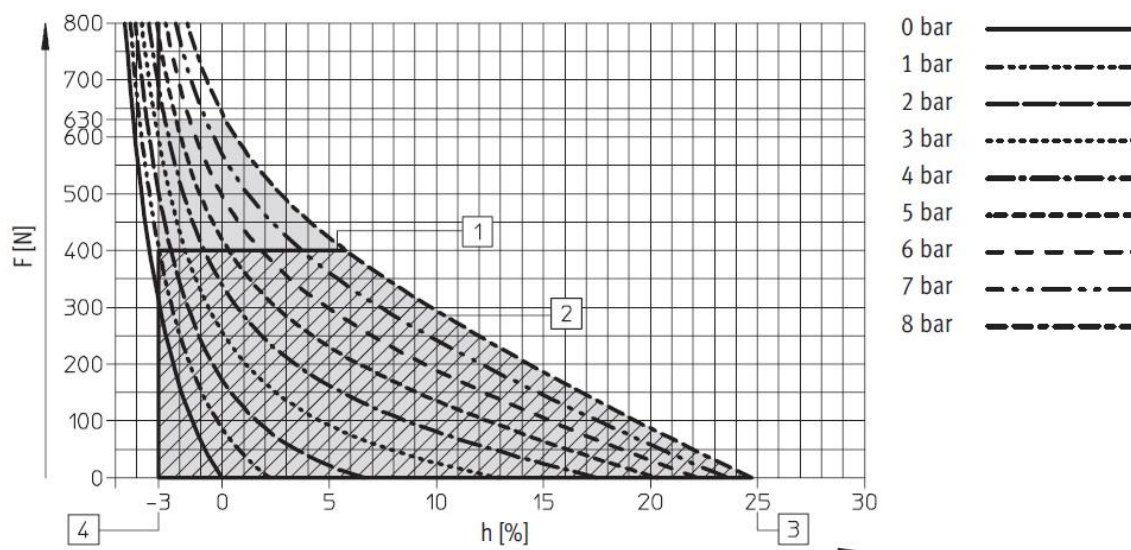


Slika 5. Umjetni pneumatski mišić [4]

### 3.2.2. Pneumatski mišić za nastavnu maketu

Za nastavnu maketu odabrana su četiri identična Festova pneumatska mišića tipa MAS. Promjer unutarnje membrane mišića je  $d_m=10$  mm. Nominalna duljina mu je  $l_0=200$  mm (duljina membrane koja se može kontrahirati). Ukupna duljina pneumatskog mišića je  $l_{uk}=260,2$  mm. Može se kontrahirati maksimalno 25% nominalne duljine u aksijalnom smjeru što iznosi 50 mm. Ima mogućnost rastezanja od 3% nominalne duljine što iznosi 6 mm. Radni tlak mu je do 8 bar. Temperatura okoliša treba biti u rasponu od  $-5$  °C do  $60$  °C. U teoriji

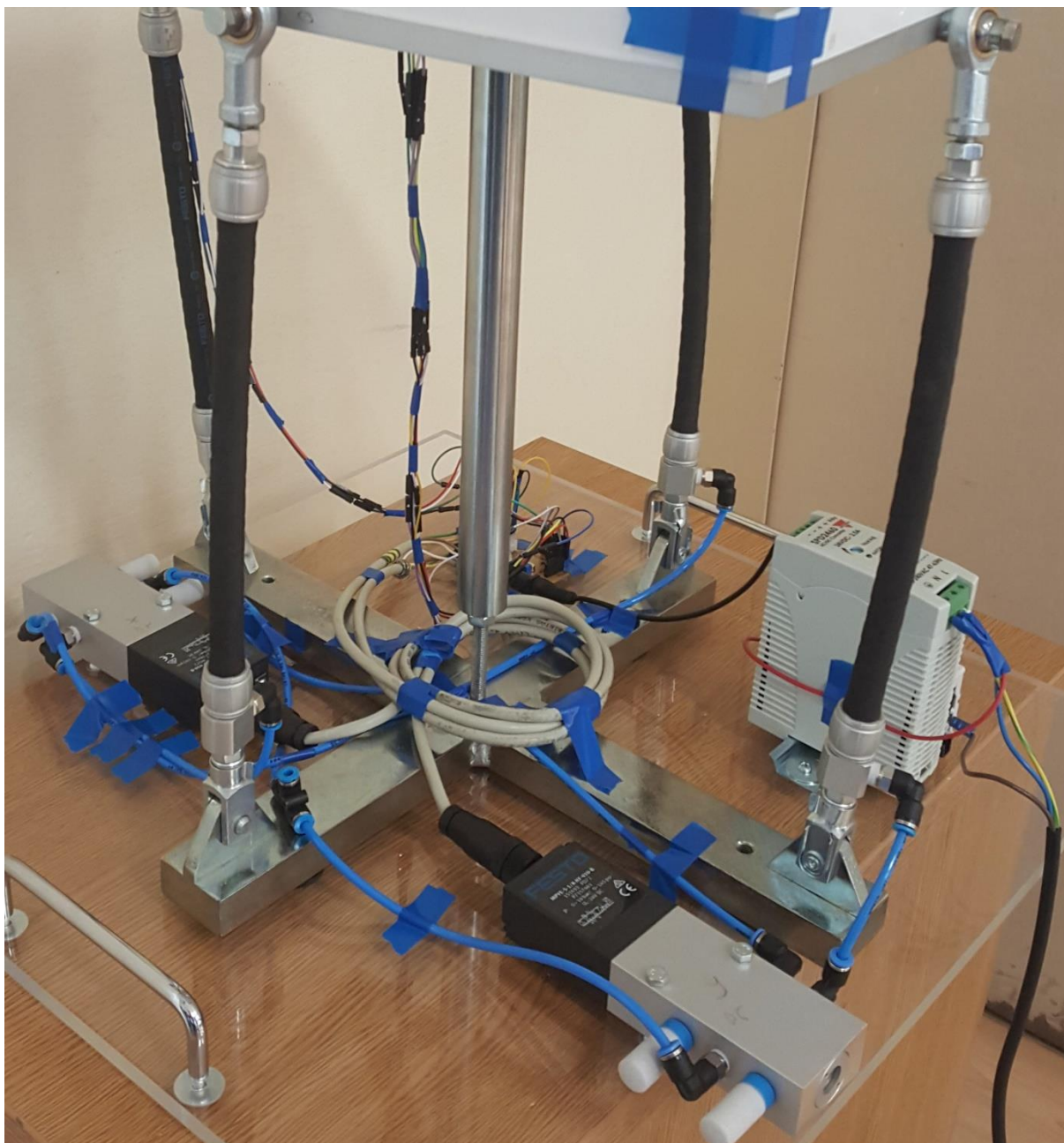
može podnijeti silu od  $F=630$  N, dok mu je kompenzacija sile 400 N pri 1 bar. Ukupna masa jednog mišića je  $m=126$  g [6].



**Slika 6. Radna karakteristika mišića [6]**

Na slici 6. prikazan je graf kontrakcija - sila za različite iznose tlakova. Iz grafa je vidljivo da postotak kontrakcije ovisi o primjenjenoj sili, a koja ovisi o iznosu tlaka. Tako pri maksimalnom tlaku od 8 bar pneumatski mišić može ostvariti vlačnu silu od 630 N. Kako se povećava iznos kontrakcije mišića prema maksimalnom iznosu od 25% i vlačna sila se smanjuje. Pri maksimalnoj kontrakciji od 25%, vlačna sila je poprimila iznos od 0 N. Pri tlaku od 1 bar i vlačne sile 400 N imamo rastezanje mišića od maksimalnih 3%.

Broj 1 na grafu prikazuje kompenzaciju sile od 400 N. Broj 2 prikazuje ponašanje mišića pri maksimalnom tlaku od 8 bar. Broj 3 prikazuje kontrakciju od 25% nominalne duljine, dok broj 4 prikazuje rastezanje od 3% nominalne duljine.



**Slika 7. Pneumatski mišići i proporcionalni ventili na nastavnoj maketi**

## 4. MJERNI ELEMENTI

Mjerenje fizikalnih veličina procesa odvija se preko mjernih pretvornika fizikalnih veličina u neku od električkih veličina. Najčešće je to strujni ili naponski signal. Ti uređaji nazivaju se senzori. Bez njih, upravljanje i regulacija ne bi bila moguća.

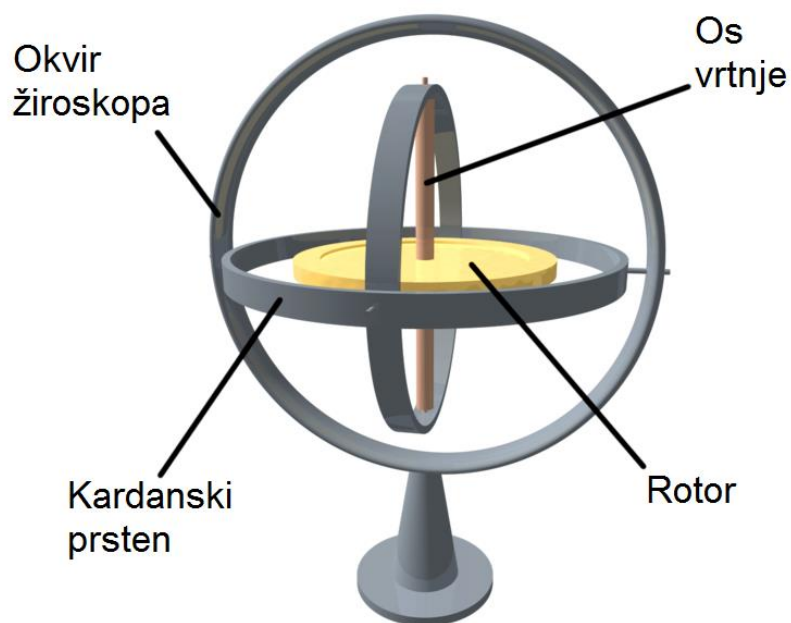
Za sustav kuglice na ploči potrebno je odabrati senzore koji mogu mjeriti poziciju i brzinu kuglice, kut zakreta i kutnu brzinu ploče po kojoj se kuglica giba, a to su:

$$x, y, \dot{x}, \dot{y}, \theta, \psi, \dot{\theta}, \dot{\psi} \quad (4.1)$$

gdje su pozicija kuglice u  $x$  i  $y$  smjeru, brzine kuglice  $\dot{x}$  i  $\dot{y}$ , kutevi zakreta ploče  $\theta$  i  $\psi$ , te kutne brzine ploče  $\dot{\theta}$  i  $\dot{\psi}$ . Senzori koji to omogućavaju su žiroskop, koji mjeri kut zakreta i kutnu brzinu ploče, te zaslon osjetljiv na dodir, tzv. *touchscreen*, koji mjeri poziciju i brzinu kuglice. Mjerenje potrebnih veličina je u regulaciji jedan od najvažnijih zadataka. Sa lošim mjerenjem, bez obzira koliko dobar regulator imali, ostvaruje se loše ponašanje sustava. Dok sa vrlo dobrim mjerenjem, uz malo lošiji regulator, i dalje se može ostvariti vrlo dobro ponašanje sustava.

### 4.1. Žiroskop

Žiroskop (ili girooskop), mjerni je instrument kojemu je glavni dio konstrukcije zvrk, slika 8. Matematičke osnove teorije zvrka prvi je dao Leonhard Euler 1765. godine. Žiroskop je mjerni pretvornik kutne brzine vrtnje. Zbog njegovih dinamičkih svojstava kao što su žiroskopska inercija, precesija, nutacija i žiroskopski reakcijski moment, koristi se na torpedima i raketama da održava smjer gibanja, u zrakoplovima (žirokompas i autopilot), i protiv ljuljanja brodova. Žiroskop je rotirajući predmet (najčešće disk), koji se nalazi u kućištu žiroskopa. Rotacija tog diska proizvodi inerciju koja zadržava os rotacije diska usmjerenu u fiksnom pravcu u prostoru. Osim rotacije oko osi, ima barem još jedan stupanj slobode gibanja i time postiže određena svojstva kao što su velika stabilnost i precesija. Precesija je pravilna promjena smjera osi rotirajućeg tijela koja nastaje kada na tijelo djeluje vanjski moment sile [7].



**Slika 8. Mehanička struktura žiroskopa [7]**

#### **4.1.1. Vrste žiroskopa**

Postoji mnogo vrsta žiroskopa s obzirom na fizikalni princip mjerne pretvorbe. Žiroskope prema tome dijelimo na:

- mehaničke žiroskope,
- optičke žiroskope,
- vibracijske žiroskope

#### **Mehanički žiroskopi**

Mehanički žiroskopi koriste fizikalni princip precesije za mjernu pretvorbu. Precesija je pravilna promjena smjera osi rotirajućeg tijela koja nastaje kada na tijelo djeluje vanjski moment sile. Promjena kutne količine gibanja ima smjer momenta sile i vektorski se zbraja s trenutačnom kutnom količinom gibanja. Neki od tipova mehaničkih žiroskopa su žiroskopi s jednim stupnjem slobode gibanja i s dva stupnja slobode gibanja [8].

## Optički žiroskopi

Optički žiroskopi koriste fizikalna svojstva svjetlosti umjesto Newtonove zakone gibanja kao mehanički žiroskopi. Optički žiroskopi rade na principu Sagnac-ovog efekta. Sagnac-ov efekt temelji se na tome da dvije svjetlosne zrake koje ulaze u rotirajući prsten u istoj točki imaju različita vremena prolaska punog kruga [8].

## Vibracijski žiroskopi

Vibracijski žiroskopi temelje se na mjernoj pretvorbi korištenjem Coriolis-ove sile. Mogu koristiti zvučne vilice, vibrirajuće žice, ljuste i cilindre [9].

### 4.1.2. MEMS izvedba

MEMS tj. mikro-elektro-mehanički-sustavi su mehanički ili elektromehanički uređaji koje pokreće električna energija. Takvi sustavi mogu registrirati, upravljati i aktivirati mehaničke procese (koji se odigravaju na nevidljivoj mikro razini) koje dalje pojedinačno ili u nizu generiraju efekte vidljive na makro razini. MEMS sustavi su se razvili kao nastavak mikroelektronike i integriranih krugova. MEMS čine mehanički elementi, senzori, aktuatori, električni i elektronički uređaji smješteni na malom silicijskom čipu [10].

## Princip mjerne pretvorbe

Žiroskop koristi Coriolisov efekt kao mjernu pretvorbu kutne brzine vrtnje. Coriolisova sila je inercijska sila koja djeluje na sve čestice u rotirajućim sustavima kad se gibaju relativno u odnosu na rotirajući koordinatni sustav. Coriolisova sila dana je vektorskom jednadžbom:

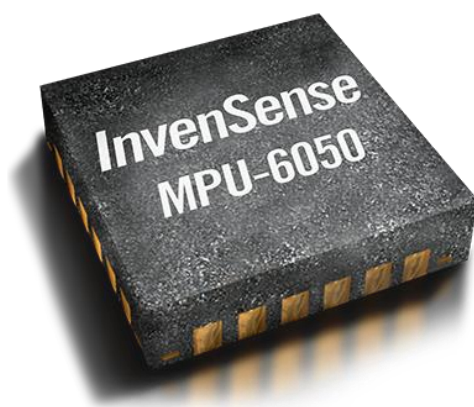
$$\vec{F}_C = -2 * m * (\vec{\omega}_P \times \vec{v}_R) \quad (4.2)$$

gdje je  $m$  masa objekta koji se giba u pomičnom rotacijskom koordinatnom sustavu,  $\vec{\omega}_P$  kutna brzina rotirajućeg koordinatnog sustava i  $\vec{v}_R$  relativna brzina mase u pomičnom koordinatnom sustavu.

### Primjena MEMS žiroskopa

- automobilska industrija
- industrijska robotika
- orijentacija svemirskih letjelica
- igraće konzole
- fotografija
- helikopteri [9]

#### 4.1.3. Žiroskop u obliku čipa oznake MPU-6050

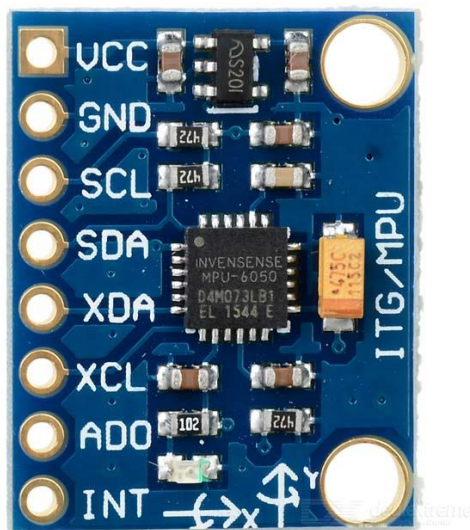


**Slika 9. Žiroskop MPU-6050 [11]**

MPU-6050 žiroskop napravljen je u MEMS izvedbi. On je ujedno i žiroskop i akcelerometar. Njegova primjena danas je vrlo raznolika. Koristi se u pametnim telefonima za naredbe preko gesti, poboljšanje mobilnih igara, fotografiranje panorama i navigaciju. MPU-6050 je jedan od prvih u svijetu koji ima integrirani šest-osni procesor za praćenje pokreta. Također se koristi za stabilizaciju slike i videa, za beskontaktnu navigaciju, prepoznavanje gesti, u sportu i fitnessu, dječjim igračkama [12].

Na slici 7. prikazan je upravljački sklop na kojem se nalazi MPU-6050 žiroskop, odabran za nastavnu maketu.





Slika 10. Upravljački sklop MPU-6050 [13]

Za ispravan rad, potreban mu je stabilizirani napon napajanja od 2,375 V - 3,46 V. MPU-6050 daje digitalni signal kutne brzine vrtnje oko x, y i z osi te signal akceleracije u smjeru x, y i z osi. Da bismo dobili signale kuta zakreta ploče, potrebno je integrirati signale kutne brzine.

Neke značajke MPU-6050 žiroskopa:

- digitalni izlaz kutne brzine za X, Y i Z os sa mogućnošću korisničkog programiranja u rasponu od  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ , i  $\pm 2000$  °/s
- vanjski sinkronizirajući signal spojen na FSYNC pin omogućava slikovnu, video i GPS sinkronizaciju
- integrirani 16-bitovni AD pretvornici omogućavaju istodobno uzorkovanje žiroskopa
- poboljšana stabilnost i osjetljivost na temperaturu smanjuju potrebu za kalibracijom
- smanjen utjecaj nisko-frekvencijskih smetnji
- mogućnost programiranja digitalnog nisko-propusnog filtera
- radna struja: 3,6 mA
- struja u *standby* načinu rada: 5  $\mu$ A
- tvornički kalibrirani faktor osjetljivosti
- korisnički *self-test* [12]





**Slika 11. Žiroskop MPU-6050 na nastavnoj maketi**

#### **4.2. Zaslون osjetljiv na dodir**

Zaslون osjetljiv na dodir je oblik senzora koji se rabi kao ulazni uređaj koji omogućuje unos prstom ili drugim predmetom na zaslonu. Time je korisniku omogućena izravna komunikacija s grafičkim elementima na zaslonu. Može detektirati poziciju točke dodira. Sve veća primjena zaslona osjetljivih na dodir u potrošačkoj elektronici, kao što su: igraće konzole, osobna računala, tableti, pametni telefoni, učinilo je zaslone osjetljive na dodir lako pristupačnima. Sve se više koriste računala sa zaslonom osjetljivim na dodir umjesto običnih računala.

Postoje različite vrste zaslona osjetljivih na dodir:

- otpornički zaslon osjetljiv na dodir
- sa površinskim zvučnim valovima
- kapacitivni
- sa infracrvenom mrežom
- infracrveno projiciranje na akrilne površine

- optički
- zasloni koji koriste tehnologiju disperzivnih signala
- sa prepoznavanjem zvuka [14]

#### 4.2.1. Zaslون sa površinskim zvučnim valovima

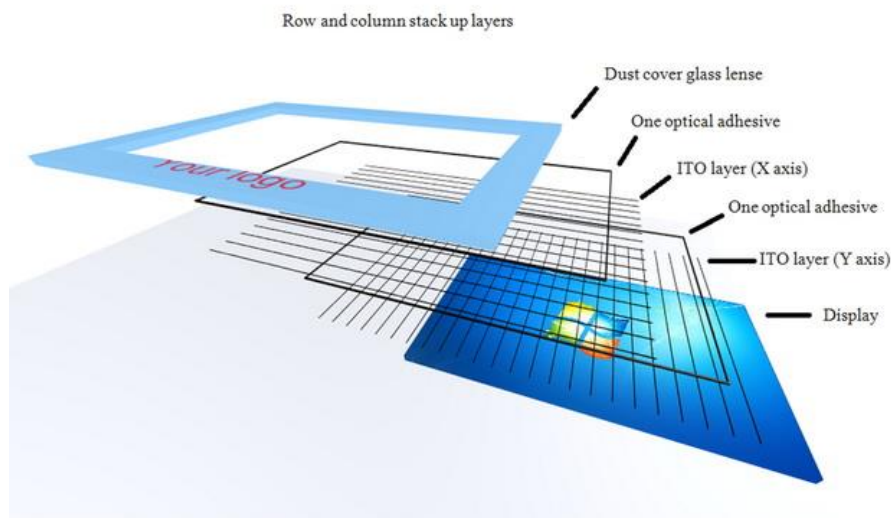
Koristi ultrazvučne valove koji prolaze kroz ploču osjetljivu na dodir. Kada se ploča dodirne, dio vala se apsorbira. Ta promjena u ultrazvučnom valu registrira poziciju dodira i šalje informaciju o tome na daljnju obradu u kontroler [14].



Slika 12. Zaslون sa površinskim zvučnim valovima [14]

#### 4.2.2. Kapacitivni zasloni osjetljivi na dodir

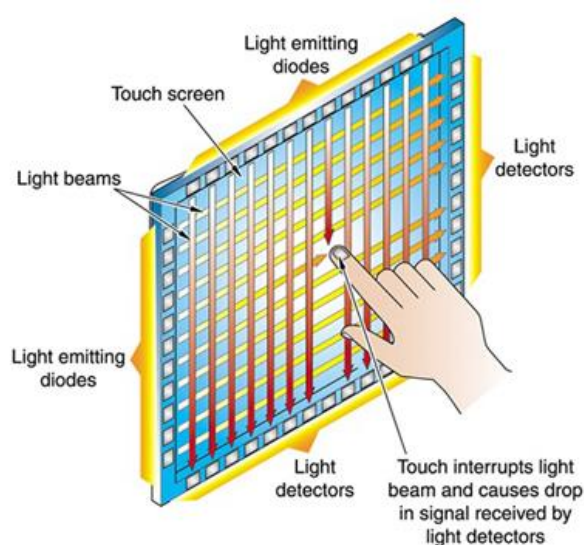
Napravljeni su od izolatora kao što je staklo, ali su premazani prozirnim električnim vodičem kao što je indij-kositar oksid. Tijelo čovjeka je također električni vodič i kada dotakne površinu zaslona dolazi do deformacije elektrostatskog polja, mjerljive kao promjena u kapacitetu. Informacija se dalje šalje u kontroler na daljnju obradu [14].



Slika 13. Kapacitivni zaslon osjetljiv na dodir [14]

#### 4.2.3. Zaslon sa infracrvenom mrežom

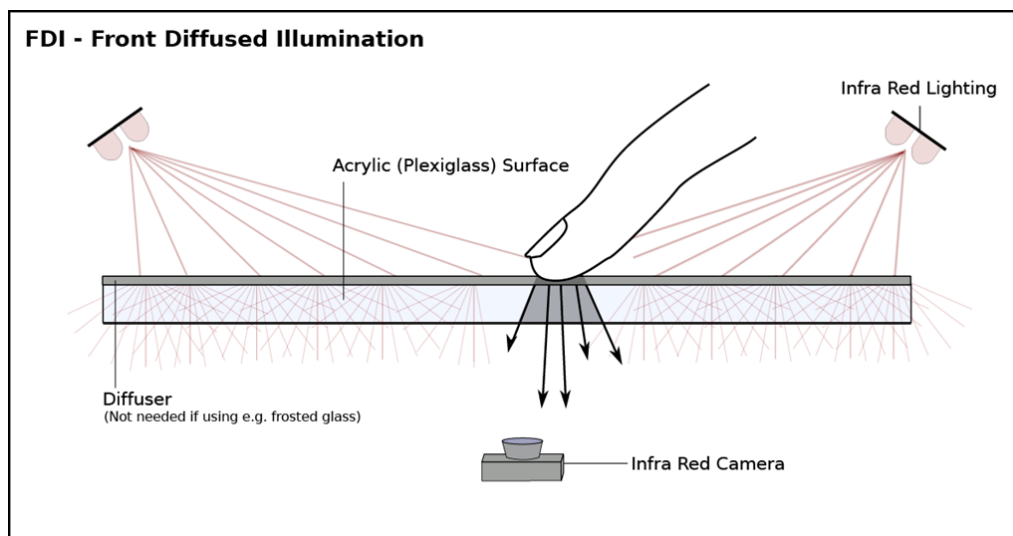
Infracrveni zaslon koristi mnogo X-Y LED dioda i foto detektora postavljenih oko ruba zaslona kako bi otkrili izmjenu u uzorku koje proizvode LED zrake. Zrake se sijeku u horizontalnim i vertikalnim uzorcima olakšavajući senzorima očitavanje pozicije. Prednost im je što mogu očitati bilo kakav unos dodira neovisno o materijalu objekta. Nedostatak im je što su vrlo osjetljivi na prašinu, i bilo kakvo presjecanje zraka uzrokuje kao „dodir“ [14].



Slika 14. Infracrveni zaslon osjetljiv na dodir [14]

#### 4.2.4. Infracrveno projiciranje na akrilne površine

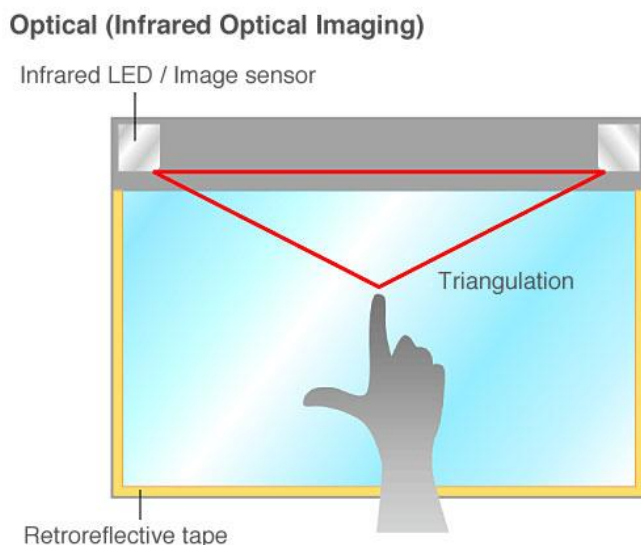
Prozirna akrilna ploča služi kao stražnji zaslon za projekciju podataka. Rubovi akrilne ploče osvijetljeni su infracrvenim LED diodama, a infracrvene kamere su usmjerene prema stražnjoj strani ploče. Objekt postavljen na ploču je detektiran od strane kamera. Kada se ploča dotakne od strane korisnika, dogodi se deformacija infracrvenih zraka, koja će biti najveća na mjestima najjačeg dodira [14].



Slika 15. Infracrveno projiciranje na akrilne površine [14]

#### 4.2.5. Optički

Optički zasloni osjetljivi na dodir su relativno moderna tehnologija. Ta tehnologija koristi dva ili više senzora koji su postavljeni na rubovima (većinom kutovima) zaslona. Infracrvena svjetla su postavljena u vidnom polju kamere, ali sa druge strane zaslona. Dodir se pojavljuje kao sjenka, a svaki par kamera može locirati dodir, čak i mjeriti veličinu dodirnog objekta [14].



Slika 16. Optički zaslon osjetljiv na dodir [14]

#### 4.2.6. Zaslone koji koriste tehnologiju disperzivnih signala

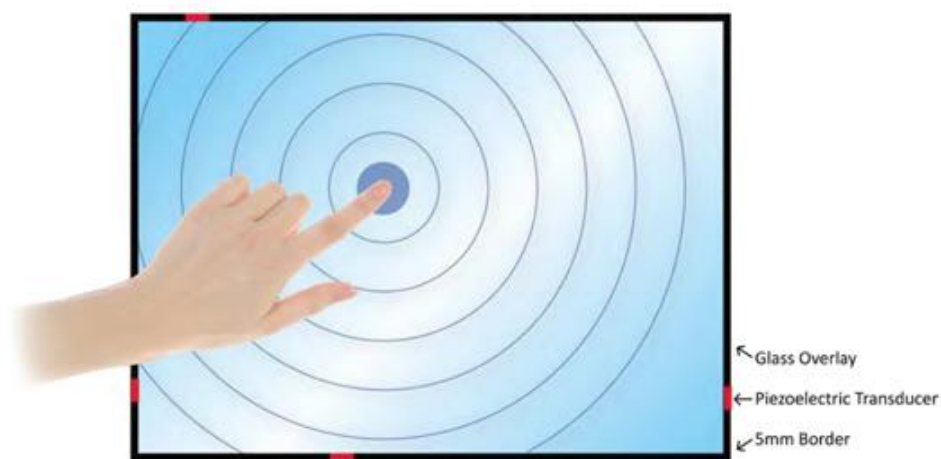
Disperzivna tehnologija signala je sustav koji koristi senzore za detekciju piezoelektričnih signala na zaslonu uzrokovanih dodirom. Kompleksni algoritmi koji interpretiraju podatke, daju točnu poziciju dodira. Tehnologija je neosjetljiva na prašinu i vanjske elemente, kao i na ogrebotine. Zbog nepotrebnih dodatnih elemenata na zaslonu, tehnologija se iskazala jako dobrom čistoćom slike. Dodir je moguće ostvariti s bilo kojim predmetom [14].



Slika 17. Zaslon koji koristi tehnologiju disperzivnih signala [14]

#### 4.2.7. Zasloni sa prepoznavanjem zvuka

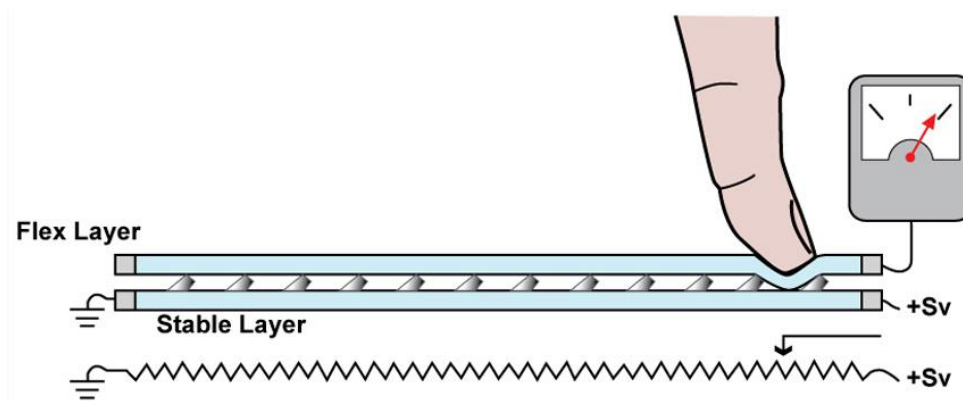
Rade tako da dodir na bilo kojem površinskom mjestu generira zvučni val u podlozi, koji proizvodi jedinstveni zvuk nakon što je pokupljen sa tri ili više pretvornika pričvršćenih na rubovima zaslona. Zvuk se zatim digitalizira pomoću kontrolera i uspoređuje sa već poznatim zvukovima koji su snimljeni prije za svaku poziciju. Položaj kursora se odmah ažurira na lokaciji dodira. Pokretni dodir je praćen brzim ponavljanjem ovog procesa. Vanjski zvukovi se ignoriraju jer se ne podudaraju sa ni jednim snimljenim zvukom [14].



Slika 18. Zaslona sa prepoznavanjem zvuka [14]

#### 4.2.8. Otpornički zasloni

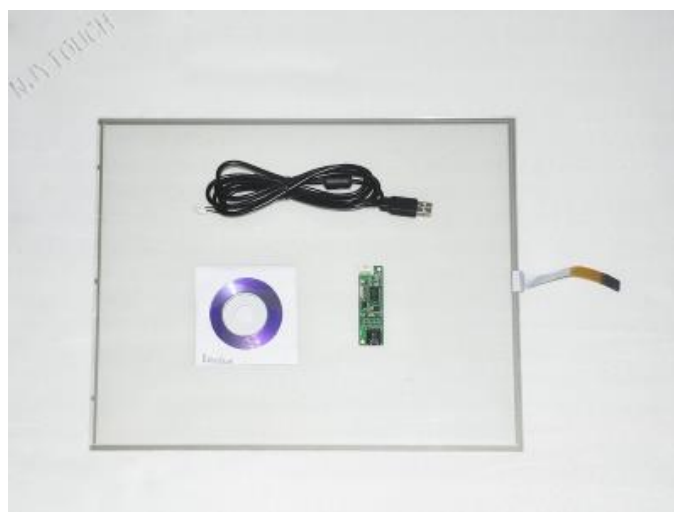
Na nastavnoj maketi ugrađen je otpornički zaslon osjetljiv na dodir od tvrtke NJY. Sastavljen je od nekoliko slojeva, od kojih su najbitniji dva tanka sloja zadužena za prijenos elektriciteta. Jedan sloj ima konduktivne spojeve sa strane, a drugi na vrhu i dnu. Napon je primijenjen na jedan sloj, dok drugi sloj ga osjeti. Kada nekakav objekt, prst ili u ovom slučaju kuglica dodirne vanjsku površinu ta dva sloja se spoje na tom mjestu. Zaslon se ponaša kao naponsko djelilo za svaku os pojedinačno. Brzom izmjenom između slojeva dolazi do čitanja pozicije pritiska. Deriviranjem signala pozicije, dobiva se signal brzine kuglice.



**Slika 19. Otpornički zaslon osjetljiv na dodir [14]**

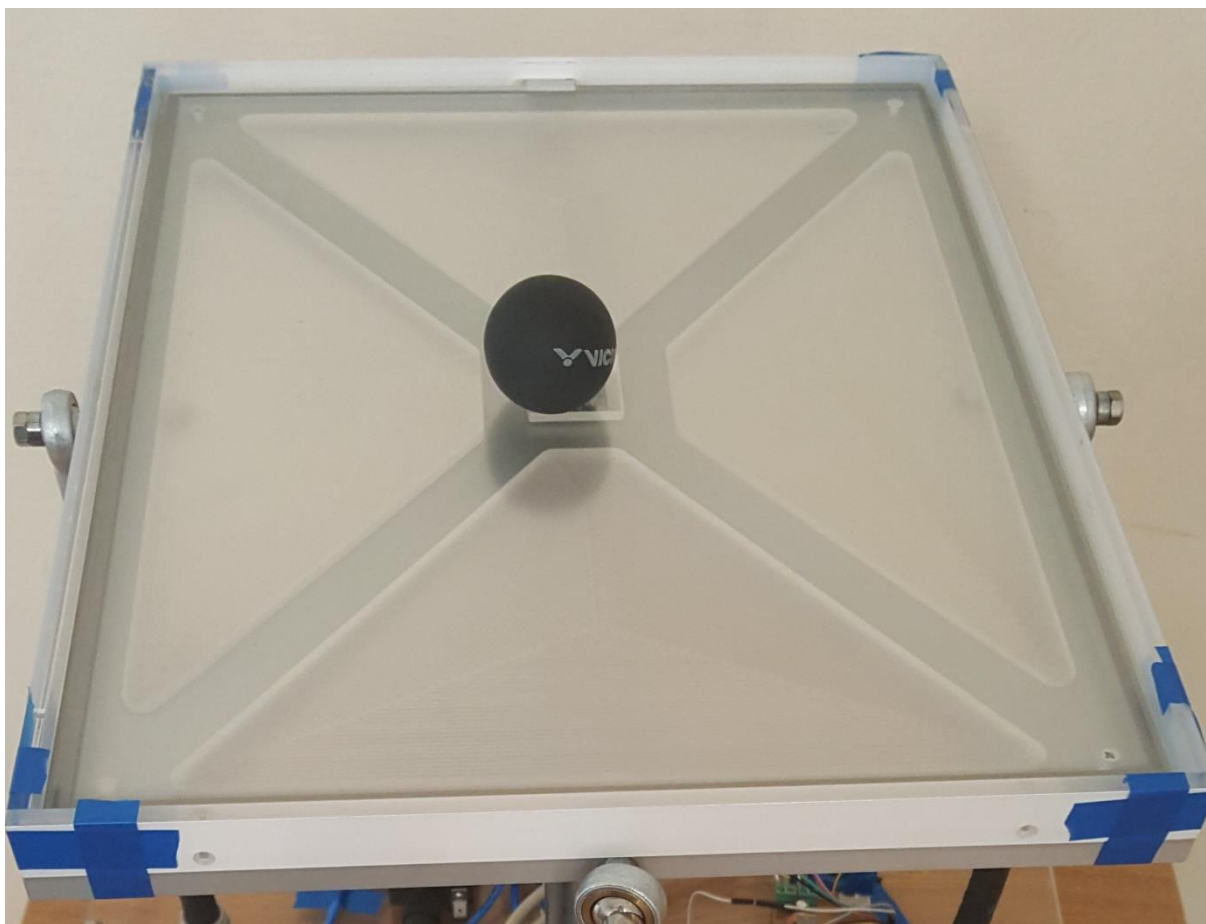
Koriste se u restoranima, tvornicama i bolnicama zbog visoke otpornosti na tekućine i prljavštine. Najveća prednost je što su jeftini. Zbog potrebnog dodira samo, mogu se koristiti i sa rukavicama, ili bilo kojim drugim predmetom. Nedostaci su što se mora pritisluti i postoji opasnost od oštećenja ostrim predmetima.

NJY rezistivni zaslon osjetljiv na dodir ima radni napon do 10 V. Odziv mu je manji od 10 ms. Radna temperatura mu je između  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pritisna sila mora biti 1 N ili veća. Debljina mu je  $a=2,3\pm 0,15\text{ mm}$ . Izolacija je veća od  $20\text{ M}\Omega$ . Otpor u smjeru X osi je  $R_x=400\text{ }\Omega \sim 700\text{ }\Omega$ , dok u Y smjeru  $R_y=235\text{ }\Omega \sim 400\text{ }\Omega$ . [15]



**Slika 20. Zaslon osjetljiv na dodir tvrtke NJY**





**Slika 21. Zaslou osjetljiv na dodir na nastavnoj maketi**



## 5. UPRAVLJAČKI ELEMENTI

Za nastavnu maketu izrađena je tiskana pločica koja na sebi ima potrebno pojačanje i mikrokontroler za potrebno programiranje sustava kuglice na ploči. Također je korišten ispravljač SPD 2460 tvrtke Carlo Gavazzi.



Slika 22. Ispravljač i tiskana pločica

### 5.1. Mikrokontroler

Mikrokontroler je sam po sebi malo računalo u jednom čipu. Sadrži jedan ili više mikroprocesora, *flash* memoriju, RAM memoriju i programabilne izlaze i ulaze. Mikrokontroleri su napravljeni tako da se odmah mogu primjeniti za razliku od mikroprocesora koji zahtijevaju različite odvojene čipove. Koriste se u automatski kontroliranim sustavima i proizvodima kao što je sustav kontrole automobilskeg motora za osiguranje optimalnih performansi motora, dalje, koriste se u medicinskim implantacijskim uređajima, za daljinske upravljače, električne alate, igračke i druge sustave. Smanjivanjem veličine i cijene mikrokontrolera, sve se više koriste kako u proizvodnji tako i u potrošačkoj elektronici.

Dok su neki ugrađeni sustavi vrlo sofisticirani, mnogi imaju minimalne zahtjeve za memorijom i duljinom programa, bez operativnog sustava i niskom složenosti softvera. Tipični ulazni i izlazni uređaji su prekidači, releji, LED diode, mali LCD ekrani, različiti senzori za temperaturu, vlažnost, jakost svjetla i sl. Ugrađeni sustavi nemaju tipkovnicu, ekran, diskove, printere ili ostale prepoznatljive ulaze/izlaze koje ima osobno računalo.

Mikrokontroleri moraju osigurati odziv u realnom vremenu na sustave kojima upravljaju. Kada dođe do određenih događaja, prekidni (engl. *interrupt*) sustav može poslati informaciju procesoru da zaustavi što trenutno radi, i da izvrši prekidnu rutinu (engl. *interrupt handler*). Nakon što je izvršena ta prekidna rutina, procesor nastavlja tamo gdje je stao prije prekida i izvršava dalje glavni program, sve dok se ne pojavi neki novi prekid.

Programi mikrokontrolera moraju biti manji od memorije mikrokontrolera kako bi mogli „stati“ u njega. Kompajleri i asembleri pretvaraju program napisan u višem programskom jeziku u kompaktan strojni jezik za pohranu u memoriju mikrokontrolera. Ovisno o uređaju, memorija može biti nepromjenjiva, odnosno memorija samo za čitanje koja može biti programirana samo u tvornici ili može biti promjenjiva (engl. *flash*). Danas se najviše koriste EEPROM (engl. *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) koja se može električki izbrisati i *flash* memorija.

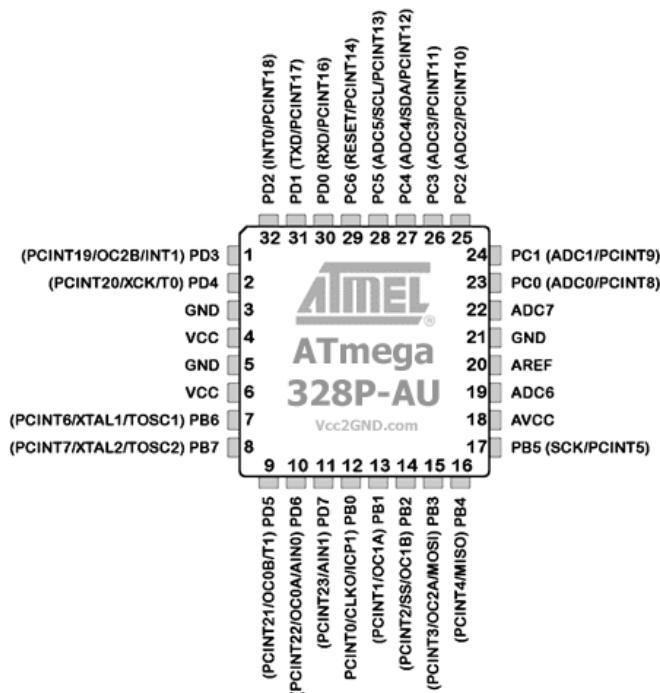
Mikrokontroleri sadrže nekoliko pinova za generalnu uporabu (GPIO). Mogu se softverski konfigurirati da budu izlazi ili ulazi. Ako se konfiguriraju kao ulazi, često se koriste da čitaju stanja senzora ili vanjskih signala. Ako se konfiguriraju kao izlazi, mogu upravljati vanjskim uređajima kao što su LED diode ili motori, često indirektno, preko dodatne elektronike.

Sadrže analogno/digitalne pretvornike jer mnogi senzori proizvode analogni signal, dok procesori mogu upravljati samo digitalnim signalima (nulama i jednicama). AD pretvornik mijenja analogni signal u digitalni tako da ga procesor može obraditi. Neki mikrokontroleri sadrže i digitalno/analogne pretvornike (DA pretvornici) koji omogućuju procesoru izlazne digitalne signale pretvoriti u analogne.

Sadrže i brojače koji mogu brojati od neke vrijednosti do nule ili od nule do neke vrijednosti. Sadrže i PWM (pulsno-širinska modulacija) blokove koji neku informaciju prebacuju u pulsirajući signal. UART (univerzalni asinkroni prijemnik/odašiljač) blokovi omogućuju primanje i slanje podataka serijskom vezom [16].

### 5.1.1. Mikrokontroler ATmega 328P-AU

Za nastavnu maketu odabran je 8-bitni ATmega 328P-AU mikrokontroler tvrtke Atmel. Zahtjeva stabilizirani napon od 5 V za uspješan rad. Preko ulaznih i izlaznih pinova, prima signale sa zaslona osjetljivog na dodir i žiroskopa, te nakon što ih obradi, šalje upravljačke signale na proporcionalni ventil. Na slici 23. prikazana je shema odabranog mikrokontrolera.



Slika 23. Shema pinova mikrokontrolera ATmega 328P-AU [17]

Značajke mikrokontrolera ATmega 328P-AU:

- napajanje: 1,8 - 5,5 V
- radna temperatura: -40 do 105 °C
- 32 KB flash memorija
- 1 KB EEPROM memorija
- dva 8-bitna brojača
- jedan 16-bitni brojač
- brojač u realnom vremenu
- šest PWM kanala

- ISP programiranje
- osam kanala 10-bitnih AD pretvornika
- SPI komunikacija
- I<sup>2</sup>C komunikacija
- USART komunikacija
- integrirani oscilator
- brzina: 20 MHz
- 23 programabilna ulazna/izlazna pina [17]

## **5.2. Tiskana pločica**

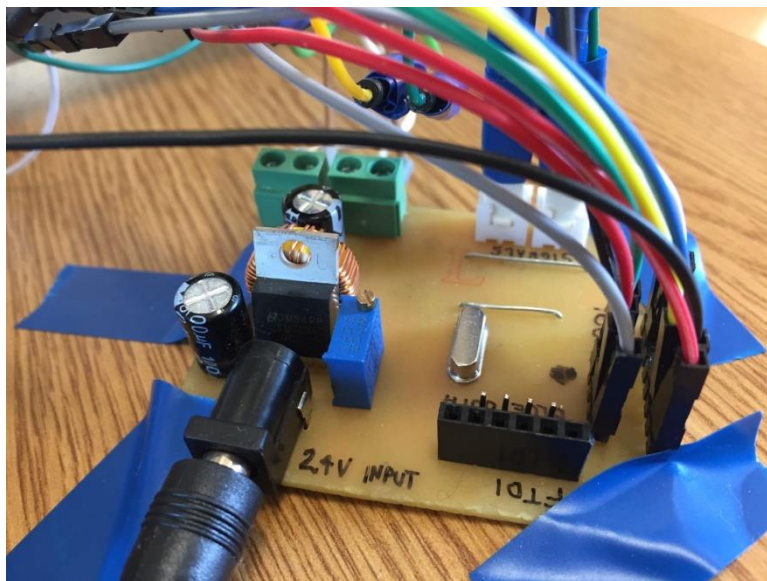
Za ispitivanje sustava kuglice na ploči, izrađena je tiskana pločica, sa prethodno opisanim mikrokontrolerom. Na pločici se nalaze svi potrebni sklopovi za uspješan rad sustava. Proporcionalni ventili zahtijevaju napajanje od 24 V, tako da je i napajanje pločice 24 V, a to se ostvaruje ispravljačem koji je opisan u sljedećem potpoglavlju. Proporcionalnim ventilima se upravlja signalom od 0 do 10 V, što znači da treba napon od 24 V spustiti na 10 V, a to se postiže preko stabilizatora napona LM2576. Mikrokontroleru treba napajanje od 5 V, a 5 V dobiva se korištenjem stabilizatora napona 78L05 koji napon od 10 V stabilizira na 5 V. Žiroskop koristi napajanje od 3,3 V, a stabilizator LM1117-3-3 stabilizira napon sa 5 V na 3,3 V. Specifikacije svih stabilizatora dane su u prilogu na kraju rada.

Na pločici se nalaze pinovi za spajanje žiroskopa, zaslona osjetljivog na dodir, za FTDI komunikaciju i ima mogućnost *bluetooth* komunikacije. Zaslona osjetljivog na dodir šalje analogne signale i spaja se na analogne pinove 23, 24, 25 i 26 mikrokontrolera koji sadrže AD pretvornike za pretvorbu analognih u digitalne signale. Žiroskop se spaja na mikrokontroler na pinove SDA (pin 27), SCL (pin 28) i pin INT (*interrupt*, pin 12). SDA i SCL pinovi omogućuju I<sup>2</sup>C komunikaciju, to je komunikacija na principu „gospodar-rob“ (engl. *master-slave*).

Pločica ima pinove za spajanje FTDI programatora. Posredno preko njega se vrši programiranje mikrokontrolera. Spojen je na pinove za slanje i primanje podataka, TXD i RXD pinove mikrokontrolera. FTDI programator se na računalo povezuje preko USB serijske

veze. Proporcionalni ventili se upravljaju preko PWM signala koji su spojeni na pin 9 i 10 na mikrokontroleru.

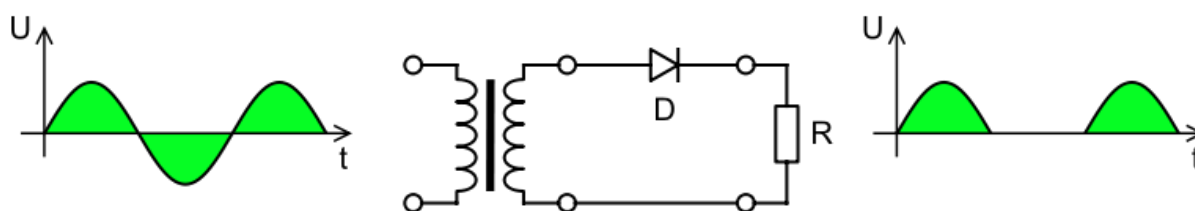
Na kraju ovog rada dana je shema pločice napravljene u programskom alatu Altium Designer, a na slici 24. prikazana je tiskana pločica. Zahvaljujem se kolegi Dominiku Sreću na izradi tiskane pločice.



**Slika 24. Tiskana pločica**

### **5.3. Napajanje sustava**

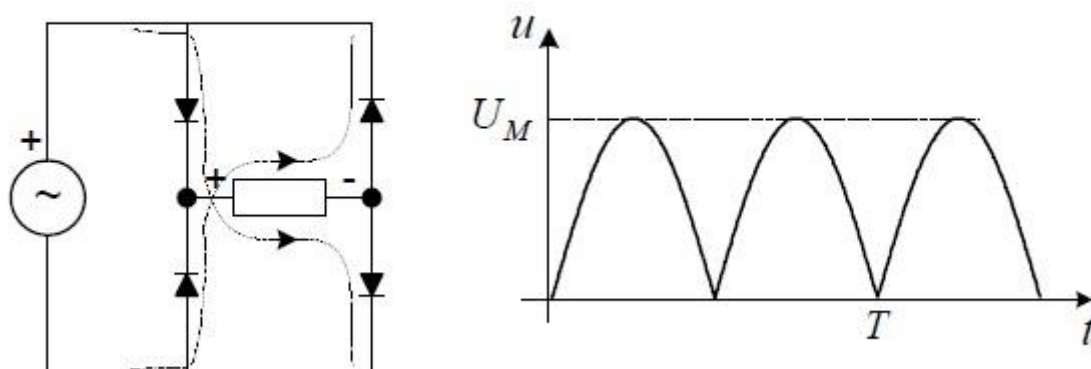
Za ispravan rad sustava potreban je ispravljač koji pretvara izmjeničnu struju (napon) u istosmjernu. Većinom se koriste poluvodičke diode za ispravljanje napona. Postoje razne izvedbe ispravljača. Dijele na poluvalne i punovalne. Poluvalni ispravljači propuštaju samo jednu poluperiodu izmjeničnog napona. Može se ostvariti ako se spoji samo jedna dioda serijski sa trošilom, slika 24.



**Slika 25. Poluvalni ispravljač [18]**

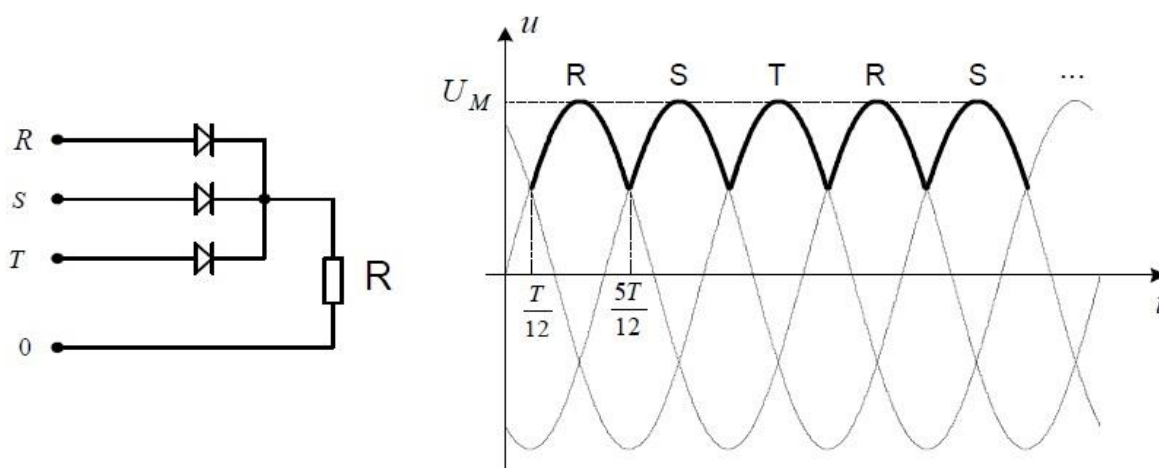
Sa slike se vidi da je takva izvedba ispravljača neefikasna i učinkovitost mu je manja od 50%. Za veću učinkovitost koriste se punovalni ispravljači u izvedbi Graetzovog mostnog spoja. Takvi ispravljači koriste četiri ispravljačke diode. Uvijek vode po dvije diode, slika 25.

### *Graetzov mostni spoj*

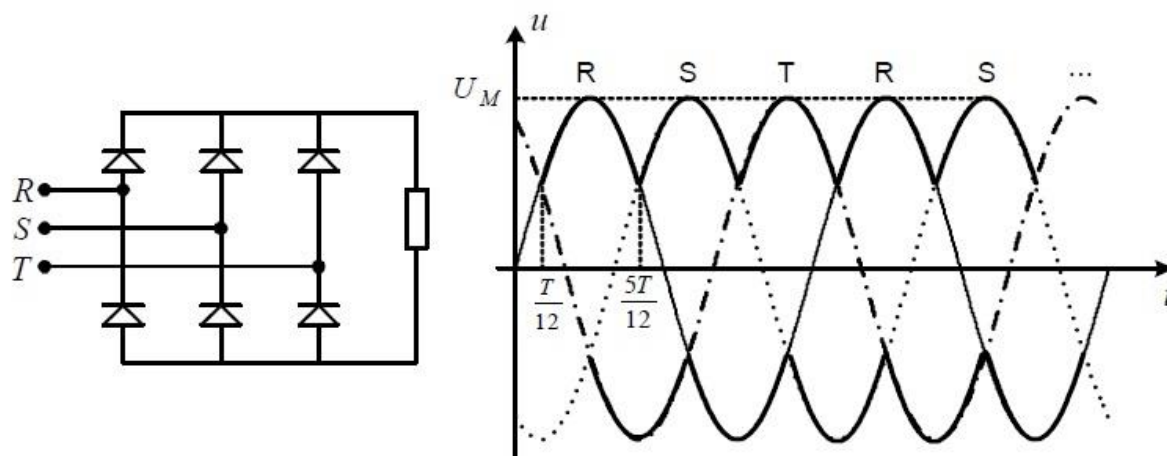


**Slika 26. Punovalni ispravljač [19]**

Također postoje i trofazni poluvalni i punovalni ispravljači. Oni se najviše koriste u industriji i pri velikim snagama. Najčešće se koriste tiristori umjesto dioda kako bi se moglo upravljati izlaznim naponom. Postoje trofazni poluvalni, trofazni punovalni sa središnjim transformatorom (danas se rijetko koristi) i trofazni punovalni sa mostnim spojem. Poluvalni koristi tri diode, po jednu za svaku fazu, slika 26., dok punovalni koristi šest dioda, slika 27.

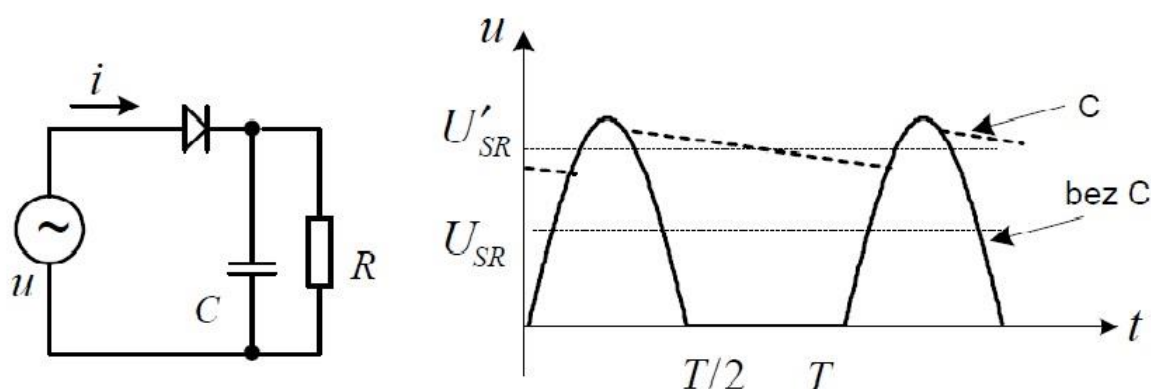


**Slika 27. Trofazni poluvalni ispravljač [19]**



Slika 28. Trofazni punovalni ispravljač [19]

Da bi se ispravljeni napon još dodatno izgladio, paralelno sa trošilom se spaja kondenzator. U praksi je nemoguće postići idealni istosmjerni napon iz izmjeničnog, uvijek mu ostaje mala valovitost.



Slika 29. Dodatno filtriranje napona [19]

Za nastavnu maketu sustava kuglice na ploči odabran je ispravljač SPD 2460 tvrtke Carlo Gavazzi, slika 28. Ispravljač izmjenični napon od 220 V pretvara u istosmjerni napon od 24 V potrebnih za napajanje tiskane pločice.





Slika 30. Ugrađeni ispravljač na nastavnoj maketi

Neke karakteristike ispravljača:

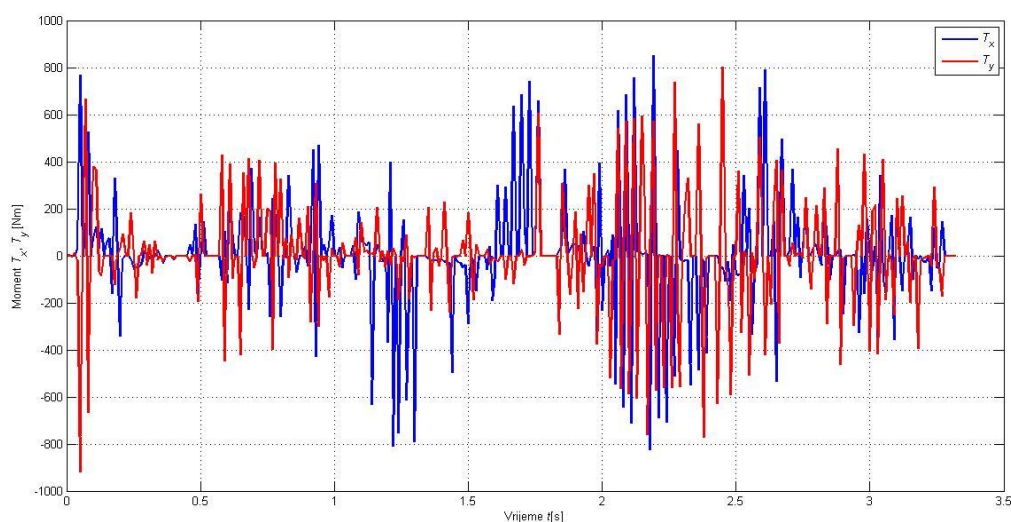
- izlazni napon: 24 V
- točnost izlaznog napona:  $\pm 2\%$
- izlazna struja: 2,5 A
- izlazna snaga: 60 W
- učinkovitost: 89%
- raspon frekvencije: 47 - 63 Hz
- temperatura okoliša: -10 °C do 71 °C



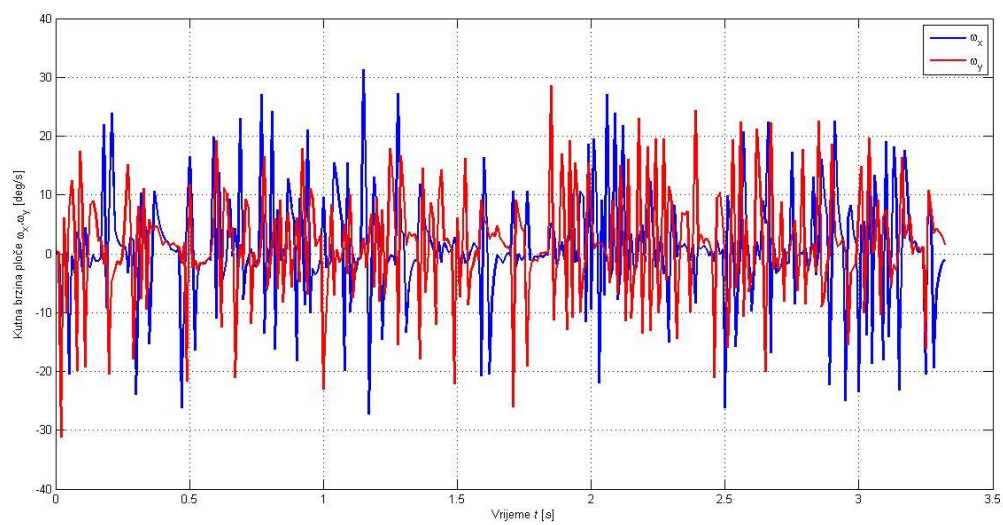
## 6. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Eksperimentalnom provjerom sustava kuglice na ploči dobije se relativno nestabilan odziv. Iako se vidi da regulator pokušava zadržati kuglicu oko sredine, kuglica je prebrza i otkotrlja se do rubova ploče, a regulator to ne stigne popratiti. Upravljački signali momenta zakreta ploče su vrlo zašumljeni. Mogući razlog tome je što žiroskop koristi signale u rasponu od 0 do 3.3 V, a proporcionalni ventili od 0 do 10 V, također, proporcionalni ventili koriste napajanje od 24 V i sve to spojeno je na istu tiskanu pločicu. Magnetske smetnje proporcionalnih ventila dodatno zašumljuju signale sa žiroskopa. Kabeli žiroskopa trebali bi biti obloženi kako bi vanjske smetnje manje utjecale na njegovo mjerenje.

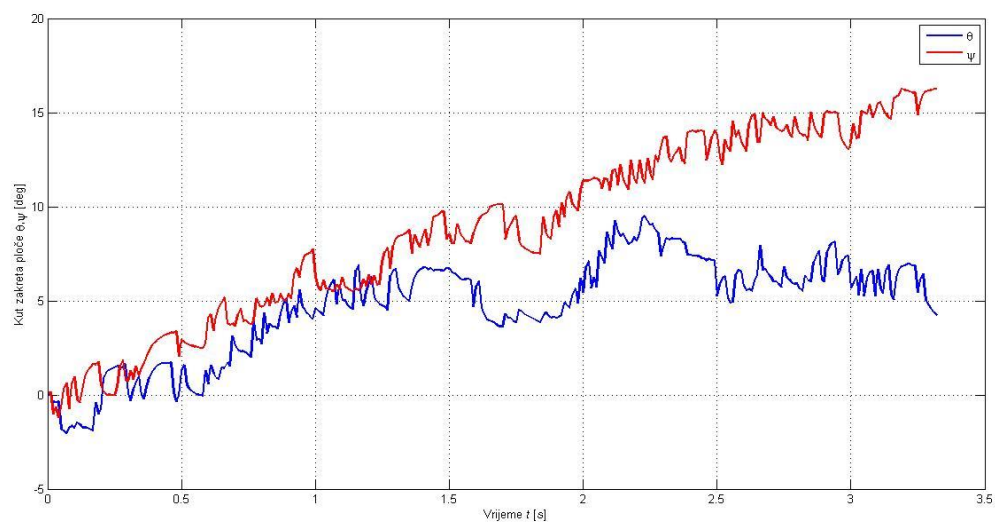
Na sljedećim slikama prikazani su odzivi upravljačkog momenta, kutna brzina ploče, kut zakreta ploče, brzina kuglice i pozicija kuglice.



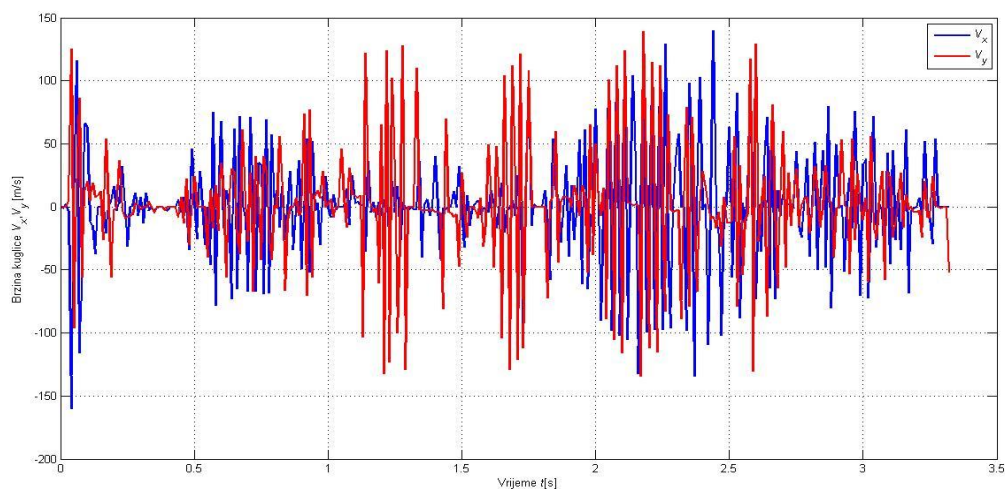
Slika 31. Odziv upravljačkog momenta



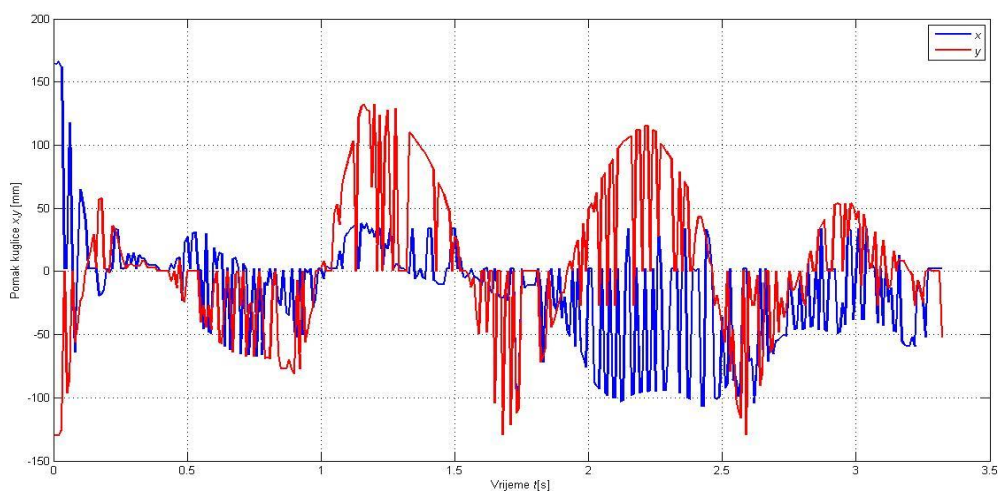
**Slika 32. Kutna brzina ploče**



**Slika 33. Kut zakreta ploče**



Slika 34. Brzina kuglice



Slika 35. Pozicija kuglice

Za daljnje poboljšanje sustava kuglice na ploči preporuča se napraviti novu tiskanu pločicu, koja bi služila za napajanje ventila i upravljanje njegovim signalima, dok bi žiroskop i zaslon osjetljiv na dodir bili spojeni na drugu pločicu ili Arduino pločicu. Dalje, preporuča se korištenje obloženog kabela za žiroskop i općenito za sve ostale komponente zbog smanjenja šuma. Za dobivanje upravljačkog signala proporcionalnih ventila od 10 V potrebno je koristiti operacijsko pojačalo sa nabojskom pumpom za simetrično napajanje operacijskog pojačala.

## 7. ZAKLJUČAK

Nastavna maketa sustava kuglice na ploči pruža velike mogućnosti edukacije studenata, prvenstveno iz područja automatske regulacije, a poslije toga i same mehatronike. Sustav kuglice na ploči je vrlo zahtjevan sustav, i treba uložiti veliki napor za njegovo uspješno svladavanje. Sustav je sam po sebi nelinearan, ali uvođenjem nekih pretpostavki i samom linearizacijom sustava, dolazi se do jednostavnijeg modela kojeg je lakše programirati i implementirati u sustav. Upravo se na izvedbi takvog programa vidjelo da su ponašanje realnog sustava i numerička simulacija dva različita tipa zadatka. Simulacija može davati prihvatljive rezultate na računalu, dok identičan program primjenjen u praksi daje prilično različite rezultate. Bez obzira koliko su male uvedene pretpostavke, one imaju veliki utjecaj na ponašanje realnog sustava. Zbog toga uvijek treba biti na oprezu i svaku simulaciju eksperimentalno provjeriti da ne bi došlo do nepredviđenog ponašanja sustava.

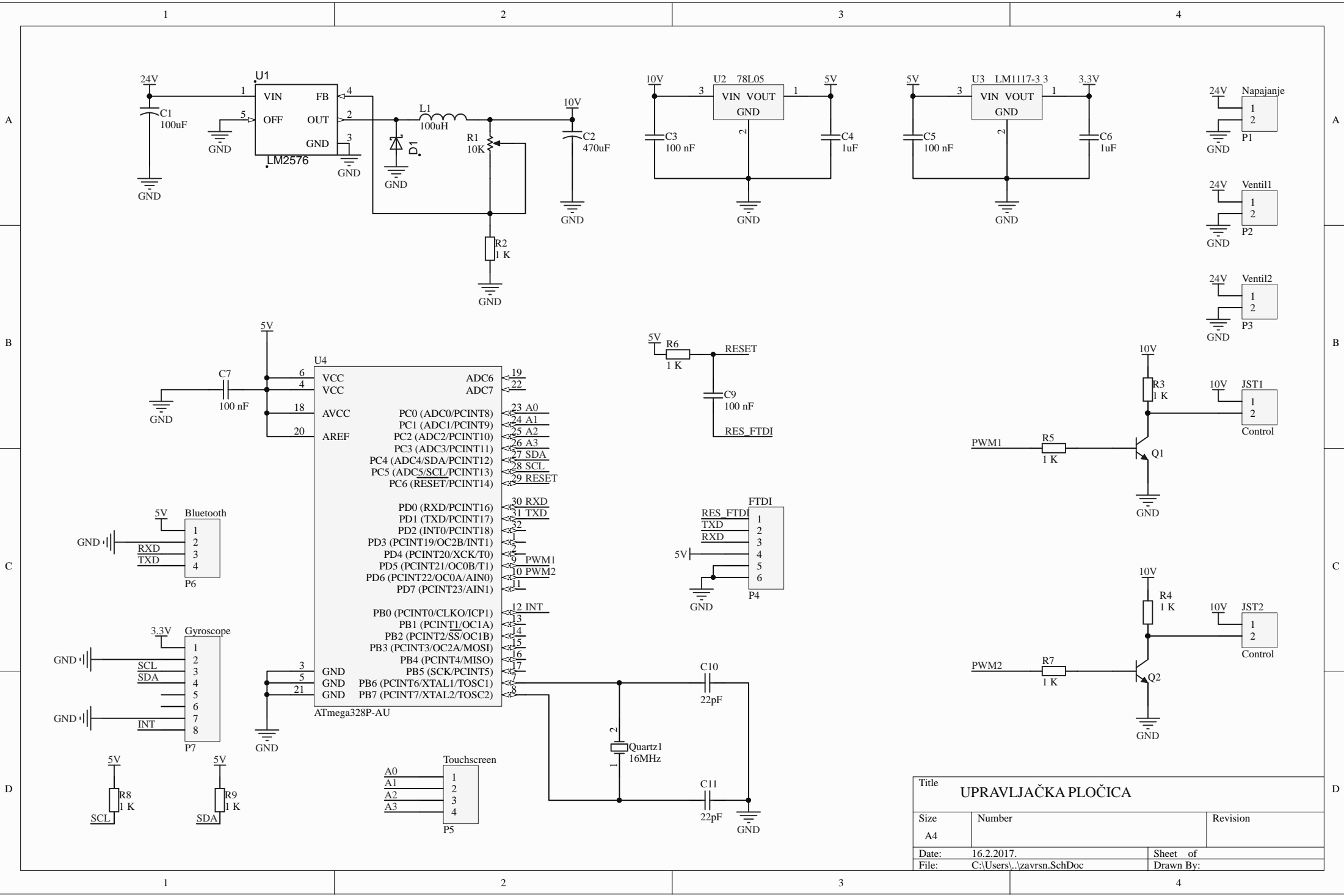
Pri izradi ovog rada stekao sam dodatna znanja u području pneumatike, elektronike, senzorike i programiranja. Uloženo je mnogo znanja, truda i volje za svladavanje raznih prepreka koje su se pojavljivale pri samom osposobljavanju nastavne makete.

## **LITERATURA**

- [1] Petrić, J., Pneumatika i hidraulika - predavanja II dio, prezentacija, FSB
- [2] The Difference Between Proportional vs. Directional vs. Servo Valves, <http://www.qualityhydraulics.com/blog/what-proportional-valve/>
- [3] FESTO, Operating instructions for MPYE-5-...-B, priručnik za upotrebu
- [4] FESTO, [https://www.festo.com/cms/hr\\_hr/index.htm](https://www.festo.com/cms/hr_hr/index.htm)
- [5] Šitum, Ž., Pneumatski mišić kao aktuator, Znanstveno-popularni časopis Sustavi, god. 3, br. 5, str. 54-60
- [6] Fluidic Muscle DMSP/MAS, katalog, Festo
- [7] Gyroscope, <https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>
- [8] Webster, J.G., Measurement and Instrumentation Sensors
- [9] Vibrating structure gyroscope, [https://en.wikipedia.org/wiki/Vibrating\\_structure\\_gyroscope](https://en.wikipedia.org/wiki/Vibrating_structure_gyroscope)
- [10] Đakov, T., Popović, I., Rajaković, Lj., Mikro-elektro-mehanički sistemi(MEMS) - Tehnologija za 21. Vek, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu
- [11] MPU-6050, <https://www.invensense.com/>
- [12] MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4
- [13] MPU-6050, [http://img.dxcn.com/productimages/sku\\_154602\\_2.jpg](http://img.dxcn.com/productimages/sku_154602_2.jpg)
- [14] Touchscreen, <https://en.wikipedia.org/wiki/Touchscreen>
- [15] NJY touchscreen, <http://www.njytouch.com/>
- [16] Microcontroller, <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller>
- [17] ATmega328P [http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Summary.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Summary.pdf)
- [18] Rectifier, <https://en.wikipedia.org/wiki/Rectifier>
- [19] Zorc, D., Materijali za nastavu iz kolegija Elektronika, FSB

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Shema tiskane pločice
- III. Karakteristike proporcionalnog ventila
- IV. Karakteristike pneumatskog mišića
- V. Karakteristike žiroskopa MPU-6050
- VI. Karakteristike mikrokontrolera ATmega 328P-AU
- VII. Karakteristike ispravljača



Title		
UPRAVLJAČKA PLOČICA		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	16.2.2017.	Sheet of
File:	C:\Users\...\zavrsn.SchDoc	Drawn By:



### Elektronisches Proportional-Wege-Ventil Typ MPYE-5-...-B



### Electronic proportional directional control valve Type MPYE-5-...-B

Einbau und Inbetriebnahme  
nur durch qualifiziertes Fachpersonal,  
gemäß Bedienungsanleitung.

Fitting and commissioning to be  
carried out by qualified personnel  
only in accordance with the operating  
instructions.

Es bedeuten/Symbols:



Warnung  
Warning, Caution



Hinweis  
Note



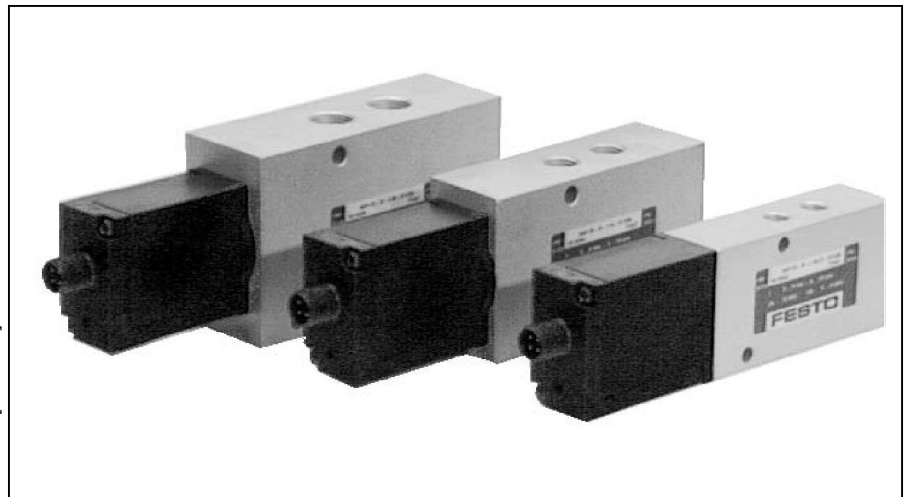
Recycling  
Recycling



Zubehör  
Accessories

1409g

8040801 [8040802]



D/GB 1

#### MPYE-5-...-B

#### pneumatisch



- Stellen Sie sicher, daß sich keine Schmutzpartikel oder Fremdkörper in den Anschlüssen des Ventils und den Schlauchleitungen befinden.



- Verwenden Sie in den Entlüftungsanschlüssen nur Schalldämpfer oder Schlauchanschlüsse. Beim Verschließen (z.B. mit Blindstopfen) ist die Funktionssicherheit beeinträchtigt.



- Vermeiden Sie die Abdichtung der Verschraubungen mit Dichtband aus PTFE. Sonst können bei der Montage PTFE-Stücke in das Ventil gelangen und zum Blockieren des Ventilschiebers führen.

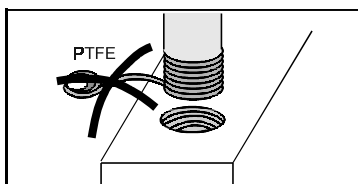


Bild 9/Fig.9



Zu hoher Restölgehalt in der Druckluft verkürzt die Lebensdauer des Ventils.

- Bei Verwendung von Bioölen (Öle, die auf der Basissynthetischer Ester oder nativer Ester aufgebaut sind z.B. Rapsölmethylester) darf der Restölgehalt von maximal 0,1 mg/m<sup>3</sup> nicht überschritten werden. (-> ISO 8573-1:2010 [7:4:2]).

#### Pneumatic

- Ensure that no dirt particles or foreign matter enter the valve ports or tubing.

- Fit only silencers or tubing fittings to the exhaust ports. If the ports are sealed (e.g. with plugs), this will impair reliable operation.

- Avoid using PTFE tape to seal the fittings. Otherwise particles of PTFE may enter the valve during assembly and cause the valve slide to seize up.

Too much residual oil content in the compressed air will reduce the service life of the valve.

- When using bio-oils (oils that are based on synthetic ester or native ester, e.g. rapeseed oil methyl ester), the maximum residual oil content of 0.1 mg/m<sup>3</sup> should not be exceeded (-> ISO 8573-1:2010 [7:4:2]).





- Verwenden Sie Festo "Quickstar-verschraubungen" beim Verschlauchen des MPYE nur einmal.

Bei mehrmaligem Einsatz können Teile der beanspruchten PTFE-Beschichtung in die Ventilanschlüsse gelangen und die Ventilfunktion beeinträchtigen.

- Verschlauchen Sie den Druckluftanschluss **4** und die Arbeitsluftanschlüsse **5**.



- Drehen Sie einen Schalldämpfer (siehe Zubehör) in die Entlüftungsanschlüsse **3**.

#### elektrisch

- Lesen Sie das Typenschild ab. Folgende Ventilvarianten werden darauf unterschieden:

Bezeichnung auf Typenschild	MPYE-5-...-010-B	MPYE-5-...-420-B
Benennung	Spannungsvariante	Stromvariante
elektrischer Sollwert	DC 0...10 V	4...20 mA

Bild 10

- If Festo "Quick Star fittings" are used to connect up the MPYE, use them once only.

If they are re-used, particles of PTFE coating may enter the valve ports and impair the valve function.

- Connect up tubing to the supply port **4** and working ports **5**.

- Screw silencers (see "Accessories") into the exhaust ports **3**.

#### Electrical

- Please read the rating plate carefully. A distinction is made there between the following valve variants:

Designation on rating plate	MPYE-5-...-010-B	MPYE-5-...-420-B
Description	Voltage variant	Current variant
Electrical setpoint	DC 0...10 V	4...20 mA

Fig. 10

1409g

D/GB 9

### MPYE-5-...-B

**FESTO**



- Verwenden Sie eine Anschlussdose mit Kabel laut Zubehör (siehe Kapitel Zubehör).

In allen anderen Fällen ist ein abgeschirmtes Kabel (z.B. 4 x 0,34 mm<sup>2</sup>) notwendig.

Anschluss der Abschirmung auf der Steuerungsseite am MPYE-fernen Kabelende.

- Use a socket and cable as described in the "Accessories" section.

Otherwise use a screened cable (e.g. 4 x 0.34 mm<sup>2</sup>).

Connect the screening at the controller end of the MPYE cable.

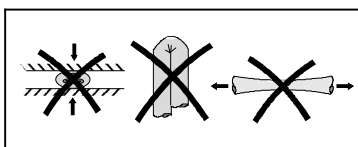


Bild 11/Fig. 11

- Stellen Sie sicher, daß die Kabel folgendermaßen verlegt sind
  - quetschfrei
  - knickfrei
  - dehnungsfrei.

- Ensure that the cable is laid so that it is
  - not crushed
  - not kinked
  - free of strain.

- Verkabeln Sie das MPYE wie folgt:

- Connect up the MPYE as follows:

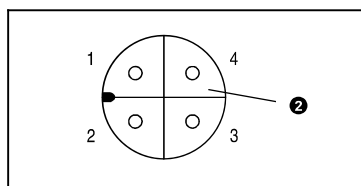


Bild 12

Pin-Nr.	Farbe*)	Pinbelegung: Spannungsvariante	Pinbelegung: Stromvariante
Pin 1	Braun	U <sub>s</sub> (DC +17...30 V)	Versorgungsspannung
Pin 2	Weiß	U <sub>s</sub> (0 V / -)	Versorgungsspannung
Pin 3	Grün	U <sub>w</sub> (0...+10 V) Sollwertspannung	I <sub>w</sub> (4...20 mA / +) Sollwertstrom
Pin 4	Gelb	U <sub>w</sub> (0 V / -) Sollwertspannung	I <sub>w</sub> (4...20 mA / -) Sollwertstrom

Bild 13 \*) Kabelfarbe unter Verwendung von Anschlusskabel KMPYE

1409g

D/GB 10

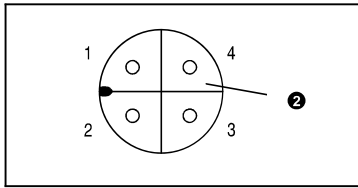


Fig. 12

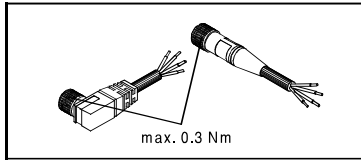


Bild 14/Fig. 14

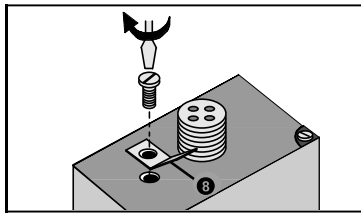


Bild 15/Fig. 15

Pin No.	Colour *)	Pin allocation: Voltage variant	Pin allocation: Current variant
Pin 1	Brown	Power supply	$V_s = (DC +17 \dots 30 \text{ V})$
Pin 2	White	Power supply	$V_s = (0 \text{ V} / -)$
Pin 3	Green	Setpoint voltage $V_w$ (0 ... +10 V)	Setpoint current $I_w$ (4...20 mA/+)
Pin 4	Yellow	Setpoint voltage $V_w$ (0 V / -)	Setpoint current $I_w$ (4...20 mA/-)

Fig. 13 \*) Colour of cable KMPYE

- Drehen Sie die Überwurfmutter der Anschlussdose mit max. 0,3 Nm fest.
  - Tighten the union nut of the socket to max. 0.3 Nm.
  - Montieren Sie den Flachstecker ⑧ mit der beiliegenden Schraube am Erdungsanschluss ① (max. Anziehdrehmoment 0,5 Nm).
  - Secure the spade connector ⑧ to the earthing connection ① with the enclosed screw (max. tightening torque 0.5 Nm).
  - Verkabeln Sie das Ventil-Gehäuse über den Flachstecker ⑧ mit Erdpotential ( $\equiv$ ).
  - Connect the valve housing to earth potential ( $\equiv$ ) by means of the spade connector ⑧.
- Dadurch wird die Störsicherheit erhöht.
- This gives enhanced immunity to interference.

1409g

D/GB 11

MPYE-5-...-B

**FESTO**

## 5

### Inbetriebnahme

- Beachten Sie die unterschiedlichen Angaben der verschiedenen Ventilvarianten.

Bezeichnung auf Typenschild	MPYE-5-...-010-B	MPYE-5-...-420-B
Benennung	Spannungsvariante	Stromvariante
elektrischer Sollwert	DC 0...10 V	4...20 mA

Bild 16

- Sorgen Sie für saubere Versorgungsluft. Sie muss ungeölt und 5 µm-gefiltert sein.

### Commissioning

- Note the different specifications for the various valve variants.

Designation on rating plate	MPYE-5-...-010-B	MPYE-5-...-420-B
Description	Voltage variant	Current variant
Electrical setpoint	DC 0...10 V	4...20 mA

Fig. 16

- Ensure that the compressed air supply is clean. The air must be unlubricated and filtered to 5 µm.

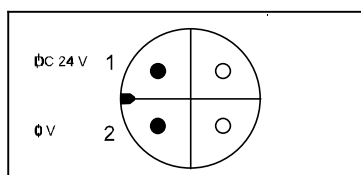


Bild 17/Fig. 17

1. Bestromen Sie die Versorgungsanschlüsse des MPYE mit Gleichstrom.

1. Feed a DC supply to the electric power supply connections of the MPYE.

1409g

D/GB 12

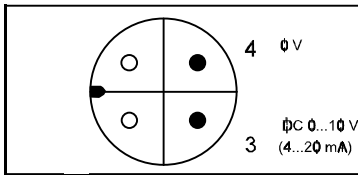


Bild 19/Fig. 19

2. Bestromen Sie das MPYE mit dem definierten Sollwertsignal:

Spannungsvariante	Stromvariante
Sollwertspannung $U_w = 5 \text{ V}$	Sollwertstrom $I_w = 12 \text{ mA}$

Bild 18

Der Ventilschieber steht in der Mittelstellung (siehe Bild 20). Der Durchfluss Q ist gesperrt (Normalleckage).

3. Ändern Sie den Sollwert.

Zur Sichtprüfung, ob die gewünschte Funktion des Ventils erreicht wird, ist am Ventil ein Sichtfenster 7 integriert.

4. Schauen Sie im Sichtfenster, ob sich die Stellung des Ventilschiebers nach Ihren Sollwert-Vorgaben ändert.

Sollwert geringer:  
Ventilschieber bewegt sich in Richtung des Sichtfensters.

Sollwert höher:  
Ventilschieber bewegt sich vom Sichtfenster weg.

2. Apply a defined setpoint signal to the MPYE:

Voltage variant	Current variant
Setpoint voltage $V_w = 5 \text{ V}$	Setpoint current $I_w = 12 \text{ mA}$

Fig. 18

The valve slide will now be in its mid-position (see Fig. 20). The flow Q is blocked (leakage rate).

3. Change the setpoint.

The valve incorporates an inspection window 7 to allow a check that the desired valve function is being obtained.

4. Look into the inspection window to check that the position of the valve slide is changing as you vary the setpoint.

Setpoint lower:  
Valve slide moves towards inspection window.

Setpoint higher:  
Valve slide moves away from inspection window.

1409g

D/GB 13


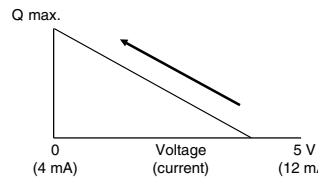
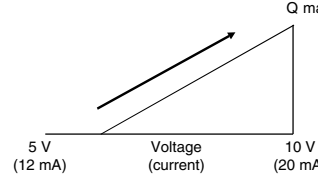
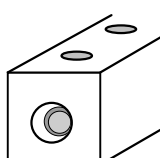
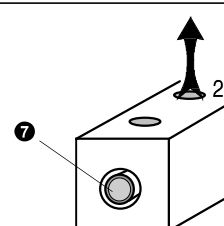
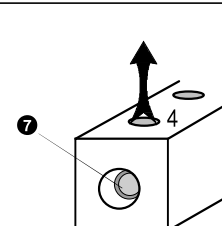
Setpoint specification as voltage value $V_w$ as current value $I_w$	5 V 12 mA	Between 0 V and 5 V Between 4 mA and 12 mA	Between 5 V and 10 V Between 12 mA and 20 mA
Flow rate (idealised)	 Mid-position in the range of the flat zone of the flow setpoint diagram (leakage rate).		
Change in flow rate	Flow rate blocked	Flow rate rises at outlet 2	Flow rate rises at outlet 4
Connections	All connections closed	Pressurisation: 1 → 2 Exhaust: 4 → 5	Pressurisation: 1 → 4 Exhaust: 2 → 3
Valve slide motion	 Mid-position (unchanged)	 Towards inspection window 7	 Away from inspection window 7

Fig. 20



5. Pressurise the MPYE slowly.

1409g

D/GB 15

## 11

## Technical specifications

- Voltage variant: MPYE-5-...-010-B ≡ 0...10 V
- Current variant MPYE-5-...-420-B ≡ 4...20 mA

Voltage variant MPYE-...	5-M5-010-B	5-1/8-LF-010-B	5-1/8-HF-010-B	5-1/4-010-B	5-3/8-010-B
Part No.	154200	151692	151693	151694	151695
Current variant MPYE-...	5-M5-420-B	5-1/8-LF-420-B	5-1/8-HF-420-B	5-1/4-420-B	5-3/8-420-B
Part No.	162959	161978	161979	161980	161981
Design	Directly-actuated slide valve with integral position controller				
Medium	Compressed air to ISO 8573-1:2010 [6:4:4] (lubricated operation not possible)				
Installation position	Any When mounted on accelerated components: Perpendicular to direction of movement				
Connections	M5	1/8	1/8	1/4	3/8
Nominal width	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
Permissible inlet pressure	Max. 10 bar				
Permissible temperature ranges:					
Storage temperature	-20 ... +60° C				
Ambient temperature	+ 0 ... +50° C				
Medium temperature	+ 5 ... +40° C				
Operating voltage:					
- Rated value	DC +24 V				
- Tolerance	DC +17...30 V (residual ripple 5% of DC component as per DIN 41 755)				

1409g

D/GB 22

Setpoints: - Setpoint voltage - Setpoint current	DC 0...+10 V 4...20 mA	mid-position at 5 V mid-position at 12 mA	(with voltage variant MPYE-5-...-010-B) (with current variant MPYE-5-...-420-B)		
Input current (setpoint)	120 µA at 10 V 0 µA at 5 V -60 µA at 0 V	(with voltage variant MPYE-5-...-010-B)		80 µA at 10 V 0 µA at 5 V -80 µA at 0 V	(with voltage variant MPYE-5-...-010-B)
Input resistance (setpoint)	255 Ω	(with current variant MPYE-5-...-420-B)		300 Ω	(with current variant MPYE-5-...-420-B)
Power consumption: - Piston mid-position - Maximum	2 W max. 20 W				
Degree of protection	IP 65 with correctly-fitted connector socket as described in "Accessories"				
CE marking (see declaration of conform- ity, <a href="http://www.festo.com/sp">www.festo.com/sp</a> )	In accordance with EU EMC Directive <sup>*)</sup> . Requirements: - housing earthed with earthing screw and cable screening at opposite end from valve electromagnetic - max. cable length: 30 m The following minimum operating quality is guaranted when there is interference from electromagnetic HF- Fields as per EN 61000-4-3: the piston slide remains within the nominal cover range.				
Approval certificate	RCM				
Standard nominal flow rate	100 l/min (±10 %)	350 l/min (±10 %)	700 l/min (±10 %)	1400 l/min (±10 %)	2000 l/min (±10 %)
Max. leakage rate in new condition (6 bar, outlets 2 and 4 closed)	7 l/min	20 l/min	25 l/min	30 l/min	35 l/min
Hysteresis	Max. 0.4% relative to maximum slide stroke				
Materials	Housing: Seals: Screws:	Anodised aluminium NBR Galvanised steel	Electronics housing: Galvanised ABS Valve slide and sleeve:Hardened aluminium		
Weight	0.255 kg	0.285 kg	0.285 kg	0.530 kg	0.740 kg

Fig. 24    <sup>\*)</sup> The device is intended for use in an industrial environment.  
Measures may need to be implemented in residential areas for interference suppression.

1409g

D/GB 23

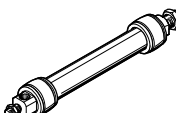
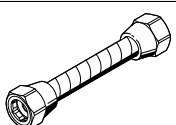
## Fluidic Muscle DMSP/MAS

**FESTO**



## Fluidic Muscle DMSP/MAS

Product range overview

Function	Version	Type	I.D. [mm]	Nominal length [mm]	Lifting force [N]
Single- acting, pulling	Fluidic Muscle with press-fitted connection				
		DMSP	5	30 ... 1000	0 ... 140
			10	40 ... 9000	0 ... 630
			20	60 ... 9000	0 ... 1500
			40	120 ... 9000	0 ... 6000
	Fluidic Muscle with screwed connection				
		MAS	10	40 ... 9000	0 ... 630
			20	60 ... 9000	0 ... 1500
			40	120 ... 9000	0 ... 6000

Type	I.D. [mm]	Max. permissible pretensioning	Max. permissible contraction	Operating pressure [bar]	→ Page/Internet
Fluidic Muscle with press-fitted connections					
DMSP	5	1% of nominal length	20% of nominal length	0 ... 6	11
	10	3% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 8	
	20	4% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 6	
	40	5% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 6	
Fluidic Muscle with screwed connection					
MAS	10	3% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 8	20
	20	4% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 6	
	40	5% of nominal length	25% of nominal length	0 ... 6	

# Fluidic Muscle MAS with screwed connection

FESTO

Technical data



- Ø - Size  
10 ... 40

- | - Nominal length  
40 ... 9000 mm

- ≡ - Lifting force  
0 ... 6000 N



General technical data				
Size	10	20	40	
Pneumatic connection	➔ Adapter MXAD-... from page 31			
Design	Contracting diaphragm			
Mode of operation	Single-acting, pulling			
I.D. [mm]	10	20	40	
Nominal length [mm]	40 ... 9000	60 ... 9000	120 ... 9000	
Stroke [mm]	0 ... 2250	0 ... 2250	0 ... 2250	
Max. additional load, freely suspended [kg]	30	80	250	
Max. permissible pretensioning <sup>1)</sup>				
Without force limiter	3% of nominal length	4% of nominal length	5% of nominal length	
With force limiter	3% of nominal length	3% of nominal length	3% of nominal length	
Max. permissible contraction	25% of nominal length			
Max. perm. offset of connections	Angle tolerance: ≤ 1.0° Parallelism tolerance: ± 0.5% (up to 400 mm nominal length), ≤ 2 mm (from 400 mm nominal length)			
Type of mounting	Via accessories			
Mounting position	Any (an external guide is required if lateral forces occur)			

1) The max. pretensioning is achieved when the max. permissible freely suspended payload is attached.

2) Measured at room temperature in accordance with ISO 23529

Operating and environmental conditions				
Size	10	20	40	
Operating pressure [bar]	0 ... 8	0 ... 6		
Operating medium	Compressed air according to ISO 8573-1:2010 [7:-:-]			
Note on operating/pilot medium	Lubricated operation possible (in which case lubricated operation will always be required)			
Ambient temperature [°C]	-5 ... +60			
Corrosion resistance class CRC <sup>3)</sup>	2			
Certification	TÜV			

3) Corrosion resistance class 2 according to Festo standard 940 070

Components subject to moderate corrosion stress. Externally visible parts with primarily decorative surface requirements which are in direct contact with a normal industrial environment or media such as coolants or lubricating agents.

Forces [N] at max. permissible operating pressure				
Size	10	20	40	
Theoretical force <sup>1)</sup>	630	1500	6000	
Force limiter	400	1200	4000	

1) For minimum nominal length, the force is reduced by approx. 10%.

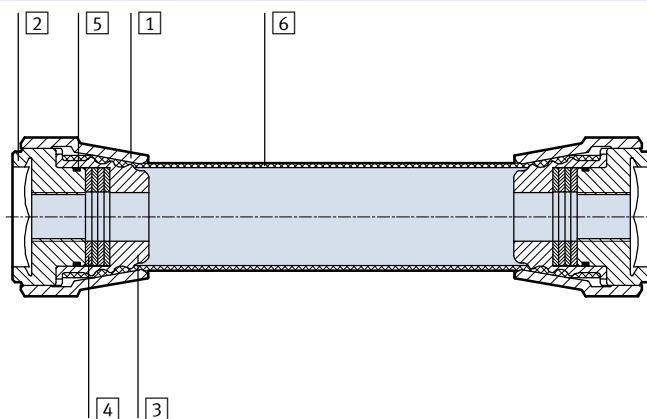
# Fluidic Muscle MAS with screwed connection

Technical data

Weight [g]			
Size	10	20	40
Product weight for 0 m length			
Without force limiter			
MAS-...-MO-O	83	239	687
MAS-...-MC-O	83	249	698
With force limiter			
MAS-...-MO-K	92	277	877
MAS-...-MC-K	92	287	888
Additional weight per 1 m length	94	178	340

## Materials

Sectional view



Fluidic Muscle		
1	Union nut	Clear anodised wrought aluminium alloy
2	Flange	Wrought aluminium alloy, blue anodised
3	Internal cone	Clear anodised wrought aluminium alloy
4	Disc springs	Steel
5	Sealing ring	NBR
6	Diaphragm	AR, CR
–	Adhesive	Loctite 243 (thread locking agent)
–	Lubricant	Klüberplex BE 31-102
Note on materials		RoHS-compliant
		Free of copper and PTFE
		Contains paint-wetting impairment substances



# Fluidic Muscle MAS with screwed connection

Technical data

FESTO

## Permissible force $F$ [N] as a function of the contraction $h$ [%] in the nominal length

Force/displacement diagrams and sizing ranges

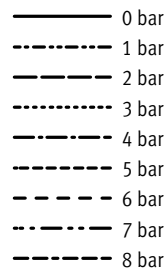
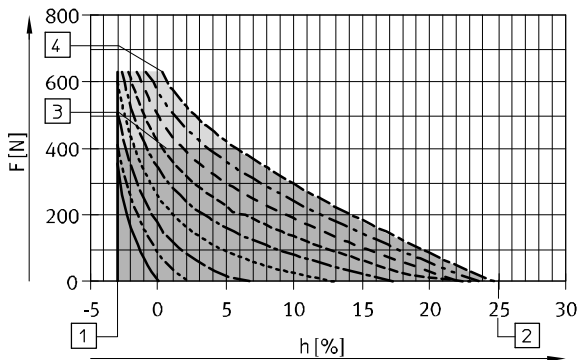
The limits specified in the technical data must be complied with when using the Fluidic Muscle. The graphs below illustrate the operating range of the Fluidic Muscle as a function of the diameter, within the limits shown below.

### Using the graphs

1. The upper limit of the grey area indicates the maximum permissible force.
2. The right limiting curve of the permissible operating ranges indicates the maximum permissible operating pressure.
3. The right vertical limit of the permissible operating ranges indicates the maximum permissible contraction.
4. The left limit of the permissible operating ranges indicates the load limit of the muscle in terms of the maximum permissible pretensioning.

### Operating range MAS-10-100N-...

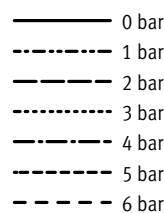
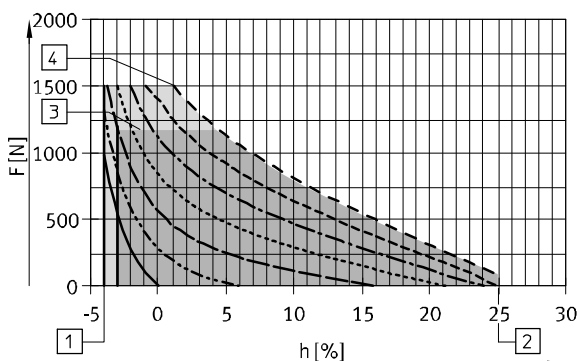
Sizing examples → 33



- 1 Max. permissible pretensioning
  - 2 Max. permissible contraction
  - 3 With force limiter at 400 N
  - 4 Theoretical force (630 N) at max. operating pressure
- Permissible operating range  
 Operating range with force limiter

### Operating range MAS-20-200N-...

Sizing examples → 33



- 1 Max. permissible pretensioning
  - 2 Max. permissible contraction
  - 3 With force limiter at 1200 N
  - 4 Theoretical force (1500 N) at max. operating pressure
- Permissible operating range  
 Operating range with force limiter



**InvenSense Inc.**

1197 Borregas Ave, Sunnyvale, CA 94089 U.S.A.  
Tel: +1 (408) 988-7339 Fax: +1 (408) 988-8104  
Website: [www.invensense.com](http://www.invensense.com)

Document Number: PS-MPU-6000A-00  
Revision: 3.4  
Release Date: 08/19/2013

# **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4**



### 3 Product Overview

#### 3.1 MPU-60X0 Overview

MotionInterface™ is becoming a “must-have” function being adopted by smartphone and tablet manufacturers due to the enormous value it adds to the end user experience. In smartphones, it finds use in applications such as gesture commands for applications and phone control, enhanced gaming, augmented reality, panoramic photo capture and viewing, and pedestrian and vehicle navigation. With its ability to precisely and accurately track user motions, MotionTracking technology can convert handsets and tablets into powerful 3D intelligent devices that can be used in applications ranging from health and fitness monitoring to location-based services. Key requirements for MotionInterface enabled devices are small package size, low power consumption, high accuracy and repeatability, high shock tolerance, and application specific performance programmability – all at a low consumer price point.

The MPU-60X0 is the world’s first integrated 6-axis MotionTracking device that combines a 3-axis gyroscope, 3-axis accelerometer, and a Digital Motion Processor™ (DMP) all in a small 4x4x0.9mm package. With its dedicated I<sup>2</sup>C sensor bus, it directly accepts inputs from an external 3-axis compass to provide a complete 9-axis MotionFusion™ output. The MPU-60X0 MotionTracking device, with its 6-axis integration, on-board MotionFusion™, and run-time calibration firmware, enables manufacturers to eliminate the costly and complex selection, qualification, and system level integration of discrete devices, guaranteeing optimal motion performance for consumers. The MPU-60X0 is also designed to interface with multiple non-inertial digital sensors, such as pressure sensors, on its auxiliary I<sup>2</sup>C port. The MPU-60X0 is footprint compatible with the MPU-30X0 family.

The MPU-60X0 features three 16-bit analog-to-digital converters (ADCs) for digitizing the gyroscope outputs and three 16-bit ADCs for digitizing the accelerometer outputs. For precision tracking of both fast and slow motions, the parts feature a user-programmable gyroscope full-scale range of  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ , and  $\pm 2000^\circ/\text{sec}$  (dps) and a user-programmable accelerometer full-scale range of  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$ , and  $\pm 16g$ .

An on-chip 1024 Byte FIFO buffer helps lower system power consumption by allowing the system processor to read the sensor data in bursts and then enter a low-power mode as the MPU collects more data. With all the necessary on-chip processing and sensor components required to support many motion-based use cases, the MPU-60X0 uniquely enables low-power MotionInterface applications in portable applications with reduced processing requirements for the system processor. By providing an integrated MotionFusion output, the DMP in the MPU-60X0 offloads the intensive MotionProcessing computation requirements from the system processor, minimizing the need for frequent polling of the motion sensor output.

Communication with all registers of the device is performed using either I<sup>2</sup>C at 400kHz or SPI at 1MHz (MPU-6000 only). For applications requiring faster communications, the sensor and interrupt registers may be read using SPI at 20MHz (MPU-6000 only). Additional features include an embedded temperature sensor and an on-chip oscillator with  $\pm 1\%$  variation over the operating temperature range.

By leveraging its patented and volume-proven Nasiri-Fabrication platform, which integrates MEMS wafers with companion CMOS electronics through wafer-level bonding, InvenSense has driven the MPU-60X0 package size down to a revolutionary footprint of 4x4x0.9mm (QFN), while providing the highest performance, lowest noise, and the lowest cost semiconductor packaging required for handheld consumer electronic devices. The part features a robust 10,000g shock tolerance, and has programmable low-pass filters for the gyroscopes, accelerometers, and the on-chip temperature sensor.

For power supply flexibility, the MPU-60X0 operates from VDD power supply voltage range of 2.375V-3.46V. Additionally, the MPU-6050 provides a VLOGIC reference pin (in addition to its analog supply pin: VDD), which sets the logic levels of its I<sup>2</sup>C interface. The VLOGIC voltage may be  $1.8V \pm 5\%$  or VDD.

The MPU-6000 and MPU-6050 are identical, except that the MPU-6050 supports the I<sup>2</sup>C serial interface only, and has a separate VLOGIC reference pin. The MPU-6000 supports both I<sup>2</sup>C and SPI interfaces and has a single supply pin, VDD, which is both the device’s logic reference supply and the analog supply for the part. The table below outlines these differences:



## MPU-6000/MPU-6050 Product Specification

Document Number: PS-MPU-6000A-00  
Revision: 3.4  
Release Date: 08/19/2013

### Primary Differences between MPU-6000 and MPU-6050

Part / Item	MPU-6000	MPU-6050
VDD	2.375V-3.46V	2.375V-3.46V
VLOGIC	n/a	1.71V to VDD
Serial Interfaces Supported	I <sup>2</sup> C, SPI	I <sup>2</sup> C
Pin 8	/CS	VLOGIC
Pin 9	AD0/SDO	AD0
Pin 23	SCL/SCLK	SCL
Pin 24	SDA/SDI	SDA



## **4 Applications**

- *BlurFree*<sup>™</sup> technology (for Video/Still Image Stabilization)
- *AirSign*<sup>™</sup> technology (for Security/Authentication)
- *TouchAnywhere*<sup>™</sup> technology (for “no touch” UI Application Control/Navigation)
- *MotionCommand*<sup>™</sup> technology (for Gesture Short-cuts)
- Motion-enabled game and application framework
- InstantGesture<sup>™</sup> iG<sup>™</sup> gesture recognition
- Location based services, points of interest, and dead reckoning
- Handset and portable gaming
- Motion-based game controllers
- 3D remote controls for Internet connected DTVs and set top boxes, 3D mice
- Wearable sensors for health, fitness and sports
- Toys



## 5 Features

### 5.1 Gyroscope Features

The triple-axis MEMS gyroscope in the MPU-60X0 includes a wide range of features:

- Digital-output X-, Y-, and Z-Axis angular rate sensors (gyroscopes) with a user-programmable full-scale range of  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ , and  $\pm 2000^\circ/\text{sec}$
- External sync signal connected to the FSYNC pin supports image, video and GPS synchronization
- Integrated 16-bit ADCs enable simultaneous sampling of gyros
- Enhanced bias and sensitivity temperature stability reduces the need for user calibration
- Improved low-frequency noise performance
- Digitally-programmable low-pass filter
- Gyroscope operating current: 3.6mA
- Standby current: 5 $\mu$ A
- Factory calibrated sensitivity scale factor
- User self-test

### 5.2 Accelerometer Features

The triple-axis MEMS accelerometer in MPU-60X0 includes a wide range of features:

- Digital-output triple-axis accelerometer with a programmable full scale range of  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  and  $\pm 16g$
- Integrated 16-bit ADCs enable simultaneous sampling of accelerometers while requiring no external multiplexer
- Accelerometer normal operating current: 500 $\mu$ A
- Low power accelerometer mode current: 10 $\mu$ A at 1.25Hz, 20 $\mu$ A at 5Hz, 60 $\mu$ A at 20Hz, 110 $\mu$ A at 40Hz
- Orientation detection and signaling
- Tap detection
- User-programmable interrupts
- High-G interrupt
- User self-test

### 5.3 Additional Features

The MPU-60X0 includes the following additional features:

- 9-Axis MotionFusion by the on-chip Digital Motion Processor (DMP)
- Auxiliary master I<sup>2</sup>C bus for reading data from external sensors (e.g., magnetometer)
- 3.9mA operating current when all 6 motion sensing axes and the DMP are enabled
- VDD supply voltage range of 2.375V-3.46V
- Flexible VLOGIC reference voltage supports multiple I<sup>2</sup>C interface voltages (MPU-6050 only)
- Smallest and thinnest QFN package for portable devices: 4x4x0.9mm
- Minimal cross-axis sensitivity between the accelerometer and gyroscope axes
- 1024 byte FIFO buffer reduces power consumption by allowing host processor to read the data in bursts and then go into a low-power mode as the MPU collects more data
- Digital-output temperature sensor
- User-programmable digital filters for gyroscope, accelerometer, and temp sensor
- 10,000 g shock tolerant
- 400kHz Fast Mode I<sup>2</sup>C for communicating with all registers
- 1MHz SPI serial interface for communicating with all registers (MPU-6000 only)
- 20MHz SPI serial interface for reading sensor and interrupt registers (MPU-6000 only)



## MPU-6000/MPU-6050 Product Specification

Document Number: PS-MPU-6000A-00  
Revision: 3.4  
Release Date: 08/19/2013

## 6 Electrical Characteristics

### 6.1 Gyroscope Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
<b>GYROSCOPE SENSITIVITY</b>						
Full-Scale Range	FS_SEL=0 FS_SEL=1 FS_SEL=2 FS_SEL=3		±250 ±500 ±1000 ±2000		°/s °/s °/s °/s	
Gyroscope ADC Word Length			16		bits	
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0 FS_SEL=1 FS_SEL=2 FS_SEL=3		131 65.5 32.8 16.4		LSB/(°/s) LSB/(°/s) LSB/(°/s) LSB/(°/s)	
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C	-3		+3	%	
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature			±2		%	
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		0.2		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
<b>GYROSCOPE ZERO-RATE OUTPUT (ZRO)</b>						
Initial ZRO Tolerance	25°C		±20		°/s	
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±20		°/s	
Power-Supply Sensitivity (1-10Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
Power-Supply Sensitivity (10 - 250Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
Power-Supply Sensitivity (250Hz - 100kHz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		4		°/s	
Linear Acceleration Sensitivity	Static		0.1		°/s/g	
<b>SELF-TEST RESPONSE</b>						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	1
<b>GYROSCOPE NOISE PERFORMANCE</b>	<b>FS_SEL=0</b>					
Total RMS Noise	DLPFCFG=2 (100Hz)		0.05		°/s-rms	
Low-frequency RMS noise	Bandwidth 1Hz to 10Hz		0.033		°/s-rms	
Rate Noise Spectral Density	At 10Hz		0.005		°/s/√Hz	
<b>GYROSCOPE MECHANICAL FREQUENCIES</b>						
X-Axis		30	33	36	kHz	
Y-Axis		27	30	33	kHz	
Z-Axis		24	27	30	kHz	
<b>LOW PASS FILTER RESPONSE</b>						
	Programmable Range	5		256	Hz	
<b>OUTPUT DATA RATE</b>						
	Programmable	4		8,000	Hz	
<b>GYROSCOPE START-UP TIME</b>						
ZRO Settling (from power-on)	<b>DLPFCFG=0</b> to ±1°/s of Final		30		ms	

- Please refer to the following document for further information on Self-Test: *MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions*



## MPU-6000/MPU-6050 Product Specification

Document Number: PS-MPU-6000A-00  
Revision: 3.4  
Release Date: 08/19/2013

### 6.3 Electrical and Other Common Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units	Notes
<b>TEMPERATURE SENSOR</b>						
Range			-40 to +85		°C	
Sensitivity	Untrimmed		340		LSB/°C	
Temperature Offset	35°C		-521		LSB	
Linearity	Best fit straight line (-40°C to +85°C)		±1		°C	
<b>VDD POWER SUPPLY</b>						
Operating Voltages		2.375		3.46	V	
Normal Operating Current	Gyroscope + Accelerometer + DMP		3.9		mA	
	Gyroscope + Accelerometer (DMP disabled)		3.8		mA	
	Gyroscope + DMP (Accelerometer disabled)		3.7		mA	
	Gyroscope only (DMP & Accelerometer disabled)		3.6		mA	
	Accelerometer only (DMP & Gyroscope disabled)		500		μA	
Accelerometer Low Power Mode Current	1.25 Hz update rate		10		μA	
	5 Hz update rate		20		μA	
	20 Hz update rate		70		μA	
	40 Hz update rate		140		μA	
Full-Chip Idle Mode Supply Current			5		μA	
Power Supply Ramp Rate	Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value			100	ms	
<b>VLOGIC REFERENCE VOLTAGE</b>						
Voltage Range	MPU-6050 only	1.71		VDD	V	
Power Supply Ramp Rate	VLOGIC must be ≤VDD at all times Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value			3	ms	
Normal Operating Current			100		μA	
<b>TEMPERATURE RANGE</b>						
Specified Temperature Range	Performance parameters are not applicable beyond Specified Temperature Range	-40		+85	°C	



## Introduction

The Atmel<sup>®</sup> picoPower<sup>®</sup> ATmega328/P is a low-power CMOS 8-bit microcontroller based on the AVR<sup>®</sup> enhanced RISC architecture. By executing powerful instructions in a single clock cycle, the ATmega328/P achieves throughputs close to 1MIPS per MHz. This empowers system designer to optimize the device for power consumption versus processing speed.

## Feature

High Performance, Low Power Atmel<sup>®</sup>AVR<sup>®</sup> 8-Bit Microcontroller Family

- Advanced RISC Architecture
  - 131 Powerful Instructions
  - Most Single Clock Cycle Execution
  - 32 x 8 General Purpose Working Registers
  - Fully Static Operation
  - Up to 20 MIPS Throughput at 20MHz
  - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
  - 32KBytes of In-System Self-Programmable Flash program Memory
  - 1KBytes EEPROM
  - 2KBytes Internal SRAM
  - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
  - Data Retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C<sup>(1)</sup>
  - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
    - In-System Programming by On-chip Boot Program
    - True Read-While-Write Operation
  - Programming Lock for Software Security
- Atmel<sup>®</sup> QTouch<sup>®</sup> Library Support
  - Capacitive Touch Buttons, Sliders and Wheels
  - QTouch and QMatrix<sup>®</sup> Acquisition
  - Up to 64 sense channels

- Peripheral Features
  - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
  - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
  - Real Time Counter with Separate Oscillator
  - Six PWM Channels
  - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
    - Temperature Measurement
  - 6-channel 10-bit ADC in PDIP Package
    - Temperature Measurement
  - Two Master/Slave SPI Serial Interface
  - One Programmable Serial USART
  - One Byte-oriented 2-wire Serial Interface (Philips I<sup>2</sup>C compatible)
  - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
  - One On-chip Analog Comparator
  - Interrupt and Wake-up on Pin Change
- Special Microcontroller Features
  - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
  - Internal Calibrated Oscillator
  - External and Internal Interrupt Sources
  - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
  - 23 Programmable I/O Lines
  - 28-pin PDIP, 32-lead TQFP, 28-pad QFN/MLF and 32-pad QFN/MLF
- Operating Voltage:
  - 1.8 - 5.5V
- Temperature Range:
  - -40°C to 105°C
- Speed Grade:
  - 0 - 4MHz @ 1.8 - 5.5V
  - 0 - 10MHz @ 2.7 - 5.5V
  - 0 - 20MHz @ 4.5 - 5.5V
- Power Consumption at 1MHz, 1.8V, 25°C
  - Active Mode: 0.2mA
  - Power-down Mode: 0.1µA
  - Power-save Mode: 0.75µA (Including 32kHz RTC)

## 1. Description

The Atmel AVR® core combines a rich instruction set with 32 general purpose working registers. All the 32 registers are directly connected to the Arithmetic Logic Unit (ALU), allowing two independent registers to be accessed in a single instruction executed in one clock cycle. The resulting architecture is more code efficient while achieving throughputs up to ten times faster than conventional CISC microcontrollers.

The ATmega328/P provides the following features: 32Kbytes of In-System Programmable Flash with Read-While-Write capabilities, 1Kbytes EEPROM, 2Kbytes SRAM, 23 general purpose I/O lines, 32 general purpose working registers, Real Time Counter (RTC), three flexible Timer/Counters with compare modes and PWM, 1 serial programmable USARTs, 1 byte-oriented 2-wire Serial Interface (I2C), a 6-channel 10-bit ADC (8 channels in TQFP and QFN/MLF packages), a programmable Watchdog Timer with internal Oscillator, an SPI serial port, and six software selectable power saving modes. The Idle mode stops the CPU while allowing the SRAM, Timer/Counters, SPI port, and interrupt system to continue functioning. The Power-down mode saves the register contents but freezes the Oscillator, disabling all other chip functions until the next interrupt or hardware reset. In Power-save mode, the asynchronous timer continues to run, allowing the user to maintain a timer base while the rest of the device is sleeping. The ADC Noise Reduction mode stops the CPU and all I/O modules except asynchronous timer and ADC to minimize switching noise during ADC conversions. In Standby mode, the crystal/resonator oscillator is running while the rest of the device is sleeping. This allows very fast start-up combined with low power consumption. In Extended Standby mode, both the main oscillator and the asynchronous timer continue to run.

Atmel offers the QTouch® library for embedding capacitive touch buttons, sliders and wheels functionality into AVR microcontrollers. The patented charge-transfer signal acquisition offers robust sensing and includes fully debounced reporting of touch keys and includes Adjacent Key Suppression® (AKS™) technology for unambiguous detection of key events. The easy-to-use QTouch Suite toolchain allows you to explore, develop and debug your own touch applications.

The device is manufactured using Atmel's high density non-volatile memory technology. The On-chip ISP Flash allows the program memory to be reprogrammed In-System through an SPI serial interface, by a conventional nonvolatile memory programmer, or by an On-chip Boot program running on the AVR core. The Boot program can use any interface to download the application program in the Application Flash memory. Software in the Boot Flash section will continue to run while the Application Flash section is updated, providing true Read-While-Write operation. By combining an 8-bit RISC CPU with In-System Self-Programmable Flash on a monolithic chip, the Atmel ATmega328/P is a powerful microcontroller that provides a highly flexible and cost effective solution to many embedded control applications.

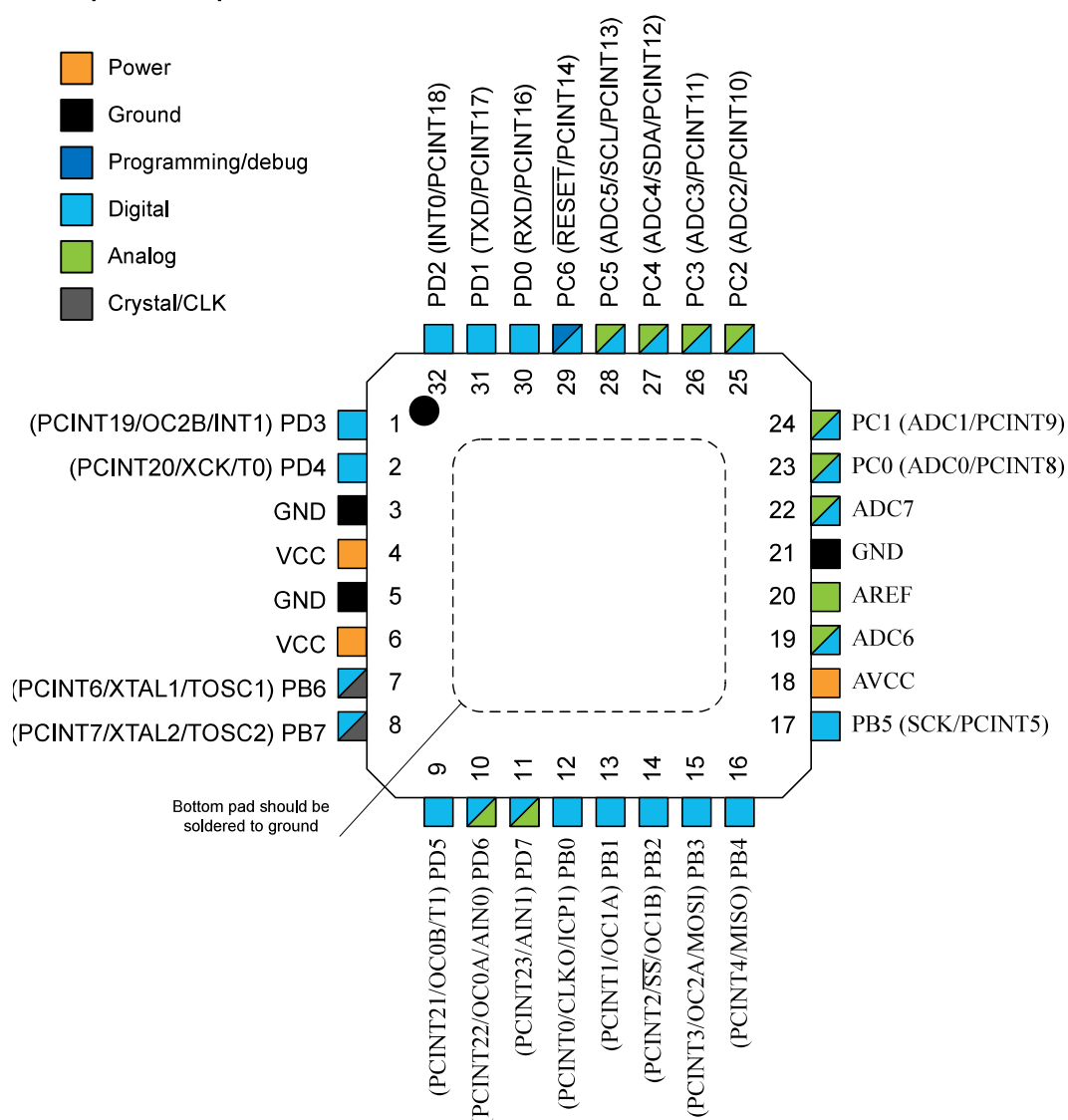
The ATmega328/P is supported with a full suite of program and system development tools including: C Compilers, Macro Assemblers, Program Debugger/Simulators, In-Circuit Emulators, and Evaluation kits.

## 2. Configuration Summary

Features	ATmega328/P
Pin Count	28/32
Flash (Bytes)	32K
SRAM (Bytes)	2K
EEPROM (Bytes)	1K
Interrupt Vector Size (instruction word/vector)	1/1/2
General Purpose I/O Lines	23
SPI	2
TWI (I <sup>2</sup> C)	1
USART	1
ADC	10-bit 15kSPS
ADC Channels	8
8-bit Timer/Counters	2
16-bit Timer/Counters	1

and support a real Read-While-Write Self-Programming mechanism. There is a separate Boot Loader Section, and the SPM instruction can only execute from there. In , there is no Read-While-Write support and no separate Boot Loader Section. The SPM instruction can execute from the entire Flash.

Figure 5-4. 32-pin MLF Top View



## 5.2. Pin Descriptions

### 5.2.1. VCC

Digital supply voltage.

### 5.2.2. GND

Ground.

### 5.2.3. Port B (PB[7:0]) XTAL1/XTAL2/TOSC1/TOSC2

Port B is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port B output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port B pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port B pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Depending on the clock selection fuse settings, PB6 can be used as input to the inverting Oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

Depending on the clock selection fuse settings, PB7 can be used as output from the inverting Oscillator amplifier.

If the Internal Calibrated RC Oscillator is used as chip clock source, PB[7:6] is used as TOSC[2:1] input for the Asynchronous Timer/Counter2 if the AS2 bit in ASSR is set.

#### 5.2.4. Port C (PC[5:0])

Port C is a 7-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The PC[5:0] output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port C pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port C pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

#### 5.2.5. PC6/RESET

If the RSTDISBL Fuse is programmed, PC6 is used as an I/O pin. Note that the electrical characteristics of PC6 differ from those of the other pins of Port C.

If the RSTDISBL Fuse is unprogrammed, PC6 is used as a Reset input. A low level on this pin for longer than the minimum pulse length will generate a Reset, even if the clock is not running. Shorter pulses are not guaranteed to generate a Reset.

The various special features of Port C are elaborated in the *Alternate Functions of Port C* section.

#### 5.2.6. Port D (PD[7:0])

Port D is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port D output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port D pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port D pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

#### 5.2.7. AV<sub>CC</sub>

AV<sub>CC</sub> is the supply voltage pin for the A/D Converter, PC[3:0], and PE[3:2]. It should be externally connected to V<sub>CC</sub>, even if the ADC is not used. If the ADC is used, it should be connected to V<sub>CC</sub> through a low-pass filter. Note that PC[6:4] use digital supply voltage, V<sub>CC</sub>.

#### 5.2.8. AREF

AREF is the analog reference pin for the A/D Converter.

#### 5.2.9. ADC[7:6] (TQFP and VFQFN Package Only)

In the TQFP and VFQFN package, ADC[7:6] serve as analog inputs to the A/D converter. These pins are powered from the analog supply and serve as 10-bit ADC channels.

# Switching Power Supply

## Type SPD 24 60

### DIN Rail mounting

Distributed by  
**General Safety Company Ltd.**  
(416) 645-0242

**CARLO GAVAZZI**



- Universal AC Input Full range
- Installation on DIN Rail 7.5 or 15mm
- Short circuit protection
- Overload protection
- High efficiency
- LED indicator for power on
- Power Ok output
- CE, TUV approved and cULus Listed

## Product Description

The Switching power supplies SPD series are specially designed to be used in all automation application where the

Installation is on a DIN rail and compact dimensions and performance are a must.

## Ordering Key

**SP D 24 60 1 B**

Model \_\_\_\_\_  
Mounting ( D = Din rail ) \_\_\_\_\_  
Output voltage \_\_\_\_\_  
Output power \_\_\_\_\_  
Input Type \_\_\_\_\_  
Optional features \_\_\_\_\_

Input type: 1= single phase

## Approvals



## Optional Features

Description	code
Spring connectors	B

## Output data

Output nominal voltage	24Vdc*	Transient recovery time	300 ms
Current	2.5 A	Ripple and noise	50mVpp
Output voltage range	24 to 28 Vdc	Efficiency typ.	84%
Line regulation	± 1%	Output Voltage accuracy	± 2%
Load regulation	± 2%	Temperature coefficient	± 0.02%/°C
		Hold up Time Vi = 115Vac	20ms
		Hold up time Vi = 230Vac	75ms

## Input data

Rated input voltage	100 - 240	Frequency range	47- 63 Hz
Voltage range		Inrush current	
AC	85 - 264 Vac	Vi= 115Vac	21A
DC	120 - 370 Vdc	Vi= 230Vac	42A

\* 5Vdc, 12Vdc and 48Vdc available, see specific data sheets

## Controls and Protections

Overload	105 – 125%	Output Short Circuit	Hiccup mode
Input Fuse	T2A/250Vac internal*	Power ready	20-24 Vdc

## General data (@ nominal line, full load, 25°C )

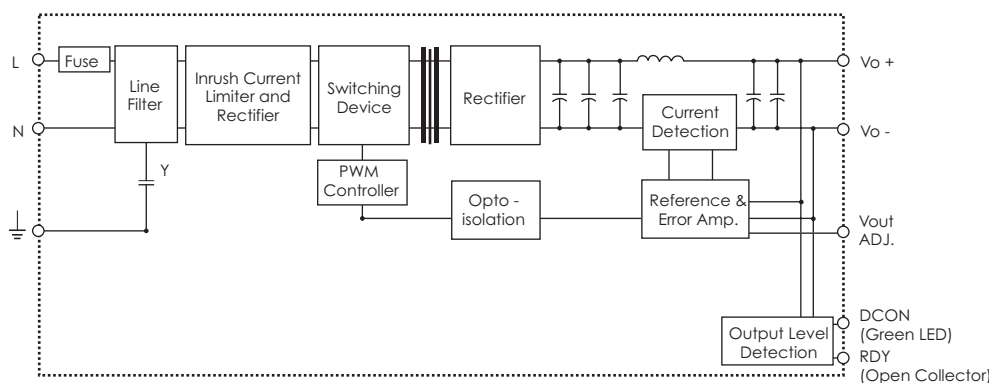
Ambient temperature	-10°C to 71°C	Cooling	Free air convection
Case temperature V/I nom	+85°C	Switching frequency	50kHz
Derating (>60°C to +71°C)	2.5%/°C	MTBF (MIL-HDBK-217F)	167.000h
Ambient humidity	<90%RH	Case material	Plastic
Storage	-25°C to +85°C	Dimensions L x W x D	90 x 40.5 x 115
Protection degree	IP20	Weight	360g

## Approvals and EMC

Insulation voltage I / O	3.000Vac	CE	<b>EN55022</b> <b>Class B</b> <b>EN55024</b> <b>EN61000-3-2</b> <b>EN61000-3-3</b>
Insulation resistance	100Mohm		
UL / cUL	UL508 listed, UL1950, UL1310 Class 2 Recognised		
TUV	EN60950		

\* fuse not replaceable by user

## Block diagrams

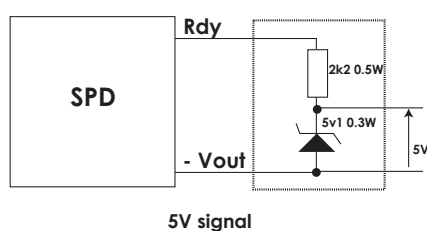
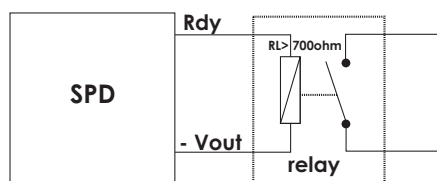


## Pin assignement and front controls

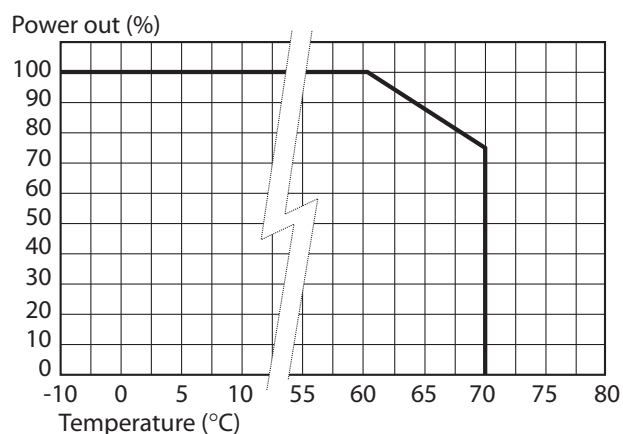
Pin No.	Designation	Description
1	RDY	DC OK, output for relay (only on 24Vdc models)
3	+	Positive output terminal
4	+	Positive output terminal
5	-	Negative output terminal
6	-	Negative output terminal
7	GND	Ground terminal to minimise High frequency emissions
8	L	Phase input ( no polarity with DC input )
9	N	Neutral input ( no polarity with DC input )
	Vout ADJ.	Trimmer for fine output voltage adjustment
	DC ON	DC output ready LED



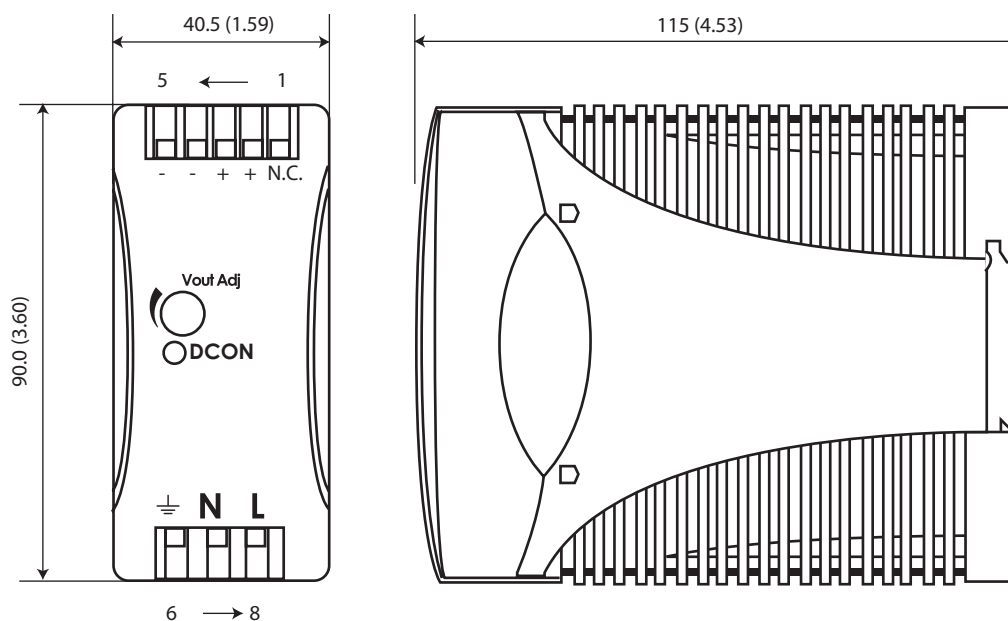
## Output Rdy Wiring diagram



## Derating Diagram



## Mechanical Drawings



## Installation

### Ventilation and cooling

Normal convection  
All sides 25mm free space  
for cooling is recommended

### Connector size range

Solid: 0.2 – 2mm<sup>2</sup>  
(AWG24-14)  
(use copper conductors only)